



TUGAS AKHIR - MO141326

***ANALISIS ULTIMATE LIMIT STATE (ULS) PADA  
FREE SPAN (STUDI KASUS : SOUTH SUMATERA-  
WEST JAVA GAS PIPELINE PROJECT PHASE II  
LABUHAN MARINGGAI-MUARA BEKASI OFFSHORE  
PIPELINE)***

IBNU KHANIFUDIN

NRP. 4310 100 032

Dosen Pembimbing :

Yoyok Setyo H., S.T., M.T., Ph.D.

Ir. Hasan Ikhwani, M.Sc.

JURUSAN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2015



FINAL PROJECT - MO141326

**ULTIMATE LIMIT STATE (ULS) ANALYSIS AT FREE  
SPAN (STUDY CASE : SOUTH SUMATERA-WEST  
JAVA GAS PIPELINE PROJECT PHASE II LABUHAN  
MARINGGAI-MUARA BEKASI OFFSHORE PIPELINE)**

IBNU KHANIFUDIN

REG. 4310 100 032

Supervisors :

Yoyok Setyo H., S.T., M.T., Ph.D.

Ir. Hasan Ikhwani, M.Sc.

DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING

Faculty of Marine Technology

Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya 2015

**ANALISIS *ULTIMATE LIMIT STATE (ULS)* PADA *FREE SPAN*  
(STUDI KASUS : *SOUTH SUMATERA-WEST JAVA GAS*  
*PIPELINE PROJECT PHASE II* LABUHAN MARINGGAI-  
MUARA BEKASI *OFFSHORE PIPELINE*)**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat

Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

pada

Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :

**IBNU KHANIFUDIN**

NRP. 4310 100 032

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

1. Yoyok Setyo H., S.T., M.T., Ph.D. .... (Pembimbing 1)

2. Ir. Hasan Ikhwani, M. Sc. .... (Pembimbing 2)

Surabaya, Januari 2015

**ANALISIS *ULTIMATE LIMIT STATE (ULS)* PADA *FREE SPAN***  
**(STUDI KASUS : *SOUTH SUMATERA-WEST JAVA GAS***  
***PIPELINE PROJECT PHASE II LABUHAN MARINGGAI-***  
***MUARA BEKASI OFFSHORE PIPELINE*)**

**Nama Mahasiswa : Ibnu Khanifudin**  
**NRP : 4310 100 032**  
**Jurusan : Teknik Kelautan**  
**Fakultas Teknologi Kelautan**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya**  
**Dosen Pembimbing : Yoyok Setyo H., S.T., M.T., Ph.D.**  
**Ir. Hasan Ikhwani, M.Sc.**

**ABSTRAK**

*Offshore pipelines* atau yang lebih dikenal dengan sebutan pipa bawah laut merupakan moda transportasi yang sangat efisien dan ekonomis yang mampu mengalirkan fluida dari satu tempat ke tempat lainnya dimana jarak antara kedua tempat tersebut umumnya relatif cukup jauh serta menjangkau antar pulau. Suatu fenomena alam yang sangat erat kaitannya dengan pipa bawah laut adalah *free span* dimana fenomena ini terjadi di dasar laut yang menyebabkan *seabed* tidak merata dan merupakan faktor alam yang tidak bisa dikendalikan secara mutlak. Kondisi *free span* tersebut mengharuskan untuk dilakukan pengecekan terhadap kekuatan struktur pipa mengingat keadaan pipa yang menggantung bebas serta tidak memiliki tumpuan. Dan salah satu metode pengecekan terhadap kekuatan struktur pipa bawah laut tersebut adalah analisis *Ultimate Limit State (ULS)*. Kriteria *ULS* ini mengacu pada *standard code* yang telah ditetapkan yaitu DNV RP F105 : *Free Spanning Pipelines*, 2006. Sedangkan detail penjelasan tentang kriteria *ULS* dijelaskan pada DNV OS F101 : *Submarine Pipeline System*, 2012. Dalam tugas akhir ini, analisis *ULS* akan dilengkapi dengan analisis batas tegangan *ultimate* sesuai pada ABS 2005 dengan menggunakan metode *incremental load* dimana beban akan ditambahkan secara bertahap hingga melebihi batas *ultimate*-nya. Hasil analisis menunjukkan bahwa tegangan-tegangan yang terjadi pada pipa bawah laut tidak melebihi batas izin yang sudah diatur dalam *standard code* atau dengan kata lain pipa bawah laut tersebut dalam kondisi aman. Sedangkan dari hasil analisis *global buckling*, menunjukkan bahwa terjadi *propagation buckling* dikarenakan nilai dari tekanan eksternal lebih besar daripada tekanan propagasi. Untuk hasil analisis batas tegangan *ultimate* menyatakan bahwa struktur pipa akan runtuh jika beban di-*increment* hingga 7,58 kali dari beban semula dimana parameter yang dinaikkan secara bertahap tersebut adalah kecepatan partikel arus dan gelombang efektif.

**Kata kunci :** *free span*, metode *incremental*, pipa bawah laut, *Ultimate Limit State (ULS)*,

**ULTIMATE LIMIT STATE (ULS) ANALYSIS AT FREE SPAN  
(STUDY CASE : SOUTH SUMATERA-WEST JAVA GAS  
PIPELINE PROJECT PHASE II LABUHAN MARINGGAI-  
MUARA BEKASI OFFSHORE PIPELINE)**

**Student Name** : Ibnu Khanifudin  
**Reg.** : 4310 100 032  
**Department** : Ocean Engineering  
Faculty of Marine Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology Surabaya  
**Supervisors** : Yoyok Setyo H., S.T., M.T., Ph.D.  
Ir. Hasan Ikhwan, M.Sc.

**ABSTRACT**

Offshore pipelines or which better known as a subsea pipelines is a modes of transportation that is very efficient and economic which are able to drain a fluid from one place to another place where the distance between the two places are generally relatively far and reach the inter-islands. A natural phenomenon that is closely related to subsea pipelines is free span in which this phenomenon occurs on the seabed that causes uneven seabed and it is a natural factors that can not be controlled absolutely. The free span conditions require to be check against the power structure of the pipe given the state of the pipe that hangs freely and do not have a pedestal. And one method of checking the strength of the structure is Ultimate Limit State (ULS) analysis. ULS criterion refers to the standard code that has been set at DNV RP F105: Free Spanning Pipelines, 2006. While detailed the explanation of that criteria described in DNV OS F101 : Submarine Pipeline System, 2012. In this final project, the analysis will be complemented with an analysis ultimate limit stress according to ABS 2005 by using an incremental method where the load will be added gradually to exceed its ultimate limits. The analysis showed that the stresses which occur in subsea pipelines does not exceed the permit limit that set out in the standard code or in other words the subsea pipeline is in a safe condition. While the results of the global buckling analysis showed that the propagation buckling occurs because the value of the external pressure is greater than the propagation pressure. For the ultimate limit stress analysis results stated that the pipeline structure will be collapse if the load increments up to 7.58 t imes of its originally load which the parameter that gradually increased is effective currents and wave particle velocity.

**Keywords** : free span, incremental method, offshore pipelines, Ultimate Limit State (ULS),

## KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.,

Alhamdulillahirobbil'alamin, puji syukur tiada hentinya penulis panjatkan kehadiran Allah SWT., Tuhan semesta alam, karena tidak lain atas berkat limpahan rahmat, taufik, serta hidayah-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “**Analisis *Ultimate Limit State (ULS)* pada *Free Span* (Studi Kasus : *South Sumatera-West Java Gas Pipeline Project Phase II Labuhan Maringgai-Muara Bekasi Offshore Pipeline*)**” ini dengan baik dan tanpa suatu halangan apapun yang berarti.

Tugas akhir ini merupakan sarana implementasi ilmu mata kuliah selama penulis menuntut ilmu di Jurusan Teknik Kelautan. Serta sebagai salah satu syarat kelulusan untuk mendapatkan gelar Sarjana Satu (S1) di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk mengetahui panjang *free span* yang dianalisa secara statis dan juga melakukan pengecekan terhadap tegangan, *buckling*, dan gaya yang berpengaruh terhadap resiko kegagalan yang terjadi pada pipa.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan laporan tugas akhir ini masih terdapat banyak sekali kekurangan sehingga jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi terwujudnya kesempurnaan laporan tugas akhir ini. Akhir kata, penulis berharap semoga laporan ini berguna buat penulis pada khususnya dan juga masyarakat pada umumnya.

Surabaya, Januari 2015

Ibnu Khanifudin

## UCAPAN TERIMA KASIH

Tugas akhir ini tidak akan terselesaikan tanpa adanya bantuan dari pihak-pihak lain yang dengan tulus dan ikhlas telah membantu penulis dalam segala proses pengerjaannya baik secara moril maupun materil. Oleh karena itu, pada kesempatan kali ini penulis mengucapkan rasa syukur dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Allah SWT., Tuhan Yang Maha Esa dan Kuasa yang telah memberikan kehendak dan kuasa-Nya dalam bentuk terselesaikannya tugas akhir ini dengan baik dan tanpa suatu halangan apapun yang berarti, sehingga memberikan kesempatan kepada penulis untuk berbagi kebermanfaatan melalui tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua tercinta, Budiman Effendi dan Mar'atul Khuzaimah yang telah memberikan rasa cinta dan kasih sayang tiada tara kepada penulis serta setiap hari mendoakan penulis agar diberikan perlindungan, kesehatan, serta kelancaran dalam menjalankan segala aktivitas kehidupan.
3. Bapak Yoyok Setyo H., S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing I yang telah merelakan waktu di sela-sela kesibukannya sebagai Sekretaris Jurusan Teknik Kelautan ITS untuk membimbing penulis dengan sabar dan ikhlas sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik dan maksimal.
4. Bapak Ir. Hasan Ikhwan, M.Sc. selaku dosen pembimbing II sekaligus sebagai dosen wali penulis yang telah merelakan waktunya untuk membimbing penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini serta mendidik penulis agar menjadi pribadi yang jujur, handal, dan berkarakter.
5. Bapak Agung Kusuma Wardana, Bapak Irsyad Aini, dan Bapak Purnawan Tirta Yuwana selaku pembimbing penulis saat melaksanakan kerja praktik di PT. Perusahaan Gas Negara (Persero), Tbk SBU Transmisi Sumatera Jawa Dinas Integritas Jaringan, Departemen Enjiniring, Jakarta, yang telah membimbing dan membantu dalam menentukan topik dari tugas akhir penulis, serta memberikan izin untuk menggunakan data guna diolah dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

6. Kedua adik kandung tersayang, Bahtera Emilia dan Hatta Anugerah yang selalu memberikan semangat dan motivasi kepada penulis untuk menyelesaikan perkuliahan dan segera membahagiakan kedua orang tua.
7. Desy Gitapratama, yang senantiasa tulus memberikan rasa kasih sayangnya dengan memotivasi, mendukung, serta selalu memberikan semangat di saat penulis sedang *low motivation*.
8. Semua staf pengajar beserta pelaksana administratif dan akademika Jurusan Teknik Kelautan ITS yang telah memberikan ilmu yang sangat bermanfaat dan pelayanan yang luar biasa selama penulis menjalankan aktivitas perkuliahan.
9. Keluarga Besar Megalodon L28 – P50 yang senantiasa menemani hari-hari penulis dalam suka ataupun duka khususnya untuk Danu, Bin, Faishal, Yuriandy, Rizal, Idham, Ficky, dan Alkhaf yang telah membantu penulis secara langsung.
10. Keluarga Besar Laboratorium Operasional Riset dan Perancangan Jurusan Teknik Kelautan ITS yang telah memberikan rasa kebersamaan dan kekeluargaan selama penulis mengerjakan tugas akhir khususnya Yusak, Reza, Destyan, Abdil, Urfan, Wisnu, Detta, Yanuar, Ade, Ardhyhan, Ega, Haris, dan Dimas.
11. Kakak-kakak senior Jurusan Teknik Kelautan ITS yang telah mendidik penulis melalui sistem pengkaderannya yang berguna dan bermanfaat, serta rela memberikan waktunya untuk berbagi ilmu dan pengalaman khususnya Tito Firmantara yang membantu penulis secara langsung dalam melakukan analisis pada *software*.
12. Adik-adik junior Jurusan Teknik Kelautan ITS yang telah mendoakan penulis dan kakak-kakak senior lainnya agar meraih kesuksesan sesuai dengan bidang karirnya masing-masing.
13. serta pihak-pihak lain yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Sekali lagi penulis ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas segala bantuan yang telah diberikan oleh pihak-pihak yang sudah penulis sebutkan di atas, dan semoga mendapatkan balasan yang setimpal dari Allah SWT.



## DAFTAR ISI

|   |          |
|---|----------|
| HALAMAN JUDUL .....   | i        |
| LEMBAR PENGESAHAN .....   | iii      |
| ABSTRAK .....   | iv       |
| ABSTRACT .....  | v        |
| KATA PENGANTAR .....  | vi       |
| UCAPAN TERIMA KASIH .....   | vii      |
| DAFTAR ISI .....  | ix       |
| DAFTAR GAMBAR .....   | xiii     |
| DAFTAR TABEL .....  | xv       |
| DAFTAR PERSAMAAN .....  | xvi      |
| DAFTAR NOTASI .....   | xviii    |
| DAFTAR LAMPIRAN .....   | xxii     |
| <br>  |          |
| <b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>                                    | <b>1</b> |
| 1.1 Latar Belakang Masalah .....                                  | 1        |
| 1.2 Perumusan Masalah .....                                       | 4        |
| 1.3 Tujuan .....  | 4        |
| 1.4 Batasan Masalah.....  | 5        |
| 1.5 Manfaat .....   | 5        |
| <br>  |          |
| <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI .....</b>              | <b>7</b> |
| 2.1 Tinjauan Pustaka .....  | 7        |
| 2.2 Dasar Teori .....   | 9        |
| 2.2.1 Pipa Bawah Laut ( <i>Offshore Pipelines</i> ) .....         | 9        |
| 2.2.2 <i>Free Span</i> .....                                      | 10       |
| 2.3 Analisis <i>Ultimate Limit State (ULS)</i> .....              | 12       |
| 2.3.1 Analisis <i>Free Span</i> Statik pada Pipa Bawah Laut ..... | 12       |
| 2.3.1.1 Momen Lentur .....  | 13       |
| 2.3.1.2 Beban Terdistribusi Merata .....                          | 14       |
| 2.3.1.3 Tegangan Longitudinal Akibat Momen Lentur .....           | 19       |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.3.1.4 Tegangan Longitudinal Akibat Beda Tekanan .....  | 20        |
| 2.3.1.5 Batas Tegangan Longitudinal Kombinasi .....  | 20        |
| 2.3.1.6 Panjang <i>Free Span</i> Statik .....  | 21        |
| 2.3.2 Analisis Tegangan-Tegangan pada Pipa Bawah Laut .....  | 21        |
| 2.3.2.1 <i>Hoop Stress</i> .....   | 21        |
| 2.3.2.2 <i>End Cap Effect Stress</i> .....   | 23        |
| 2.3.2.3 <i>Bending Stress</i> .....  | 23        |
| 2.3.2.4 <i>Thermal Stress</i> .....  | 24        |
| 2.3.2.5 <i>Poisson Stress</i> .....  | 25        |
| 2.3.2.6 <i>Longitudinal Stress</i> .....   | 25        |
| 2.3.2.7 <i>Equivalent Stress</i> .....   | 25        |
| 2.3.2.8 Kriteria <i>Allowable Stress Design (ASD)</i> .....  | 26        |
| 2.3.3 Analisis Kriteria <i>Global Buckling</i> pada Pipa Bawah Laut .....  | 26        |
| 2.3.3.1 <i>System Collapse</i> .....   | 26        |
| 2.3.3.2 <i>Pressure Containment</i> .....  | 28        |
| 2.3.3.3 <i>Propagation Buckling</i> .....  | 28        |
| 2.3.3.4 <i>Combined Loading Criteria</i> .....   | 30        |
| 2.3.3.4.1 Tekanan Internal Berlebih ( <i>Internal Overpressure</i> ) .....   | 30        |
| 2.3.3.4.2 Tekanan Eksternal Berlebih ( <i>External Overpressure</i> ).....   | 31        |
| 2.3.4 Analisis Batas Tegangan <i>Ultimate</i> .....  | 31        |
| 2.4 Metode Elemen Hingga .....   | 33        |
| 2.4.1 Dasar Metode Elemen Hingga.....  | 33        |
| 2.4.2 Konsep Elemen Hingga Nonlinier Ansys.....  | 34        |
| <b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>   | <b>35</b> |
| 3.1 Metode Penelitian .....  | 35        |
| 3.1.1 Metodologi Analisis <i>Free Span</i> Statik pada Pipa Bawah Laut .....   | 36        |
| 3.1.2 Metodologi Analisis Tegangan-Tegangan dan Kriteria <i>Allowable Stress Design (ASD)</i> pada Pipa Bawah Laut ..... | 37        |
| 3.1.3 Metodologi Analisis Kriteria <i>Global Buckling</i> pada Pipa Bawah Laut .....                                     | 39        |
| 3.1.4 Metodologi <i>Incremental Load</i> .....   | 41        |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.2 Prosedur Penelitian .....   | 41        |
| <b>BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>                                     | <b>49</b> |
| 4.1 Data-Data .....   | 49        |
| 4.1.1 Data Properti Pipa .....  | 52        |
| 4.1.2 Data Material Pipa .....  | 52        |
| 4.1.3 Data Lingkungan .....   | 53        |
| 4.1.4 Data Operasional Pipa .....   | 54        |
| 4.1.5 Data Penunjang .....  | 54        |
| 4.2 Perhitungan Analisis <i>Ultimate Limit State (ULS)</i> .....                      | 54        |
| 4.2.1 Perhitungan Analisis <i>Free Span</i> Statik pada Pipa Bawah Laut .....         | 54        |
| 4.2.1.1 Perhitungan Beban Hidrodinamik .....  | 55        |
| 4.2.1.2 Perhitungan Beban Pipa Terendam .....   | 57        |
| 4.2.1.3 Perhitungan Beban Terdistribusi Merata .....                                  | 58        |
| 4.2.1.4 Perhitungan Tegangan Longitudinal Akibat Beda Tekanan .....                   | 58        |
| 4.2.1.5 Perhitungan Tegangan Longitudinal Akibat Momen Lentur .....                   | 58        |
| 4.2.1.6 Perhitungan Panjang <i>Free Span</i> Statik .....                             | 58        |
| 4.2.2 Perhitungan Analisis Tegangan-Tegangan pada Pipa Bawah Laut ....                | 58        |
| 4.2.2.1 Perhitungan <i>Hoop Stress</i> .....  | 58        |
| 4.2.2.2 Perhitungan <i>End Cap Effect Stress</i> .....                                | 59        |
| 4.2.2.3 Perhitungan <i>Bending Stress</i> .....                                       | 59        |
| 4.2.2.4 Perhitungan <i>Thermal Stress</i> .....                                       | 60        |
| 4.2.2.5 Perhitungan <i>Poisson Stress</i> .....                                       | 60        |
| 4.2.2.6 Perhitungan <i>Longitudinal Stress</i> .....                                  | 60        |
| 4.2.2.7 Perhitungan <i>Equivalent Stress</i> .....                                    | 60        |
| 4.2.2.8 Perhitungan Analisis Kriteria <i>Allowable Stress Design (ASD)</i> ....       | 60        |
| 4.2.3 Perhitungan Analisis Kriteria <i>Global Buckling</i> pada Pipa Bawah Laut ..... | 62        |
| 4.2.3.1 Perhitungan <i>System Collapse</i> .....                                      | 62        |
| 4.2.3.2 Perhitungan <i>Pressure Containment</i> .....                                 | 64        |
| 4.2.3.3 Perhitungan <i>Propagation Buckling</i> .....                                 | 64        |
| 4.2.3.4 Perhitungan <i>Combined Loading Criteria</i> .....                            | 65        |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.2.4 Perhitungan Analisis Batas Tegangan <i>Ultimate</i> ..... | 66        |
| 4.3 Pemodelan dengan <i>Software</i> Ansys .....                | 67        |
| <b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>                         | <b>73</b> |
| 5.1 Kesimpulan .....  | 73        |
| 5.2 Saran .....   | 73        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>                                     | <b>75</b> |
| <b>LAMPIRAN</b>   |           |
| <b>BIODATA PENULIS</b>  |           |

## DAFTAR TABEL

|                   |  |    |
|-------------------|--|----|
| <b>Tabel 2.1</b>  | Tegangan yang Dizinkan pada <i>Offshore pipelines</i> .....  | 13 |
| <b>Tabel 2.2</b>  | <i>Recommended Hydrodynamics Coefficient</i> (Mouselli, 1981).....                                       | 18 |
| <b>Tabel 2.3</b>  | Konstanta Perletakan Ujung Bentang Bebas pada Analisis Statik ....                                       | 24 |
| <b>Tabel 4.1</b>  | Data Lingkungan dengan Periode Ulang 100 Tahun-an .....  | 51 |
| <b>Tabel 4.2</b>  | Data Properti Pipa .....   | 52 |
| <b>Tabel 4.3</b>  | Data Material Pipa .....   | 52 |
| <b>Tabel 4.4</b>  | Data Lingkungan .....  | 53 |
| <b>Tabel 4.5</b>  | Data Operasional Pipa .....  | 54 |
| <b>Tabel 4.6</b>  | Data Penunjang .....   | 54 |
| <b>Tabel 4.7</b>  | Hasil Perhitungan Kecepatan Horizontal Partikel Air .....  | 56 |
| <b>Tabel 4.8</b>  | Hasil Perhitungan Koefisien Hidrodinamik .....   | 57 |
| <b>Tabel 4.9</b>  | Hasil Perhitungan Beban Pipa Terendam .....  | 57 |
| <b>Tabel 4.10</b> | <i>Usage Factors</i> untuk Pengecekan Tegangan Ekvivalen .....   | 61 |
| <b>Tabel 4.11</b> | Hasil Analisis <i>Allowable Stress Design (ASD)</i> .....  | 61 |
| <b>Tabel 4.12</b> | Faktor Fabrikasi Maksimum .....  | 62 |
| <b>Tabel 4.13</b> | Hasil Perhitungan Karakteristik Tekanan <i>Collapse</i> .....  | 62 |
| <b>Tabel 4.14</b> | Hasil Pengecekan terhadap <i>System Collapse</i> .....   | 63 |
| <b>Tabel 4.15</b> | <i>Material Resictance Factor</i> .....  | 63 |
| <b>Tabel 4.16</b> | <i>Safety Class Resictance Factor</i> .....  | 63 |
| <b>Tabel 4.17</b> | Hasil Pengecekan terhadap <i>Pressure Containment</i> .....  | 64 |
| <b>Tabel 4.18</b> | Hasil Pengecekan terhadap <i>Propagation Buckling</i> .....  | 65 |
| <b>Tabel 4.19</b> | Hasil Perhitungan Variabel-Variabel pada <i>Combined Loading</i><br><i>Criteria</i> .....                | 65 |
| <b>Tabel 4.20</b> | Hasil Pengecekan terhadap <i>Combined Loading Criteria</i> Kondisi<br><i>Internal Overpressure</i> ..... | 66 |
| <b>Tabel 4.21</b> | Hasil Pengecekan terhadap <i>Combined Loading Criteria</i> Kondisi<br><i>External Overpressure</i> ..... | 66 |
| <b>Tabel 4.22</b> | Tegangan yang Dihasilkan pada <i>Equivalent Stress</i> dengan Metode<br><i>Incremental Load</i> .....    | 67 |

## DAFTAR GAMBAR

|                    |  |    |
|--------------------|--|----|
| <b>Gambar 1.1</b>  | Peta potensi cadangan gas bumi di Indonesia .....  | 1  |
| <b>Gambar 1.2</b>  | Jalur pipa transmisi PT. PGN Persero Tbk., SBU TSJ.....  | 3  |
| <b>Gambar 2.1</b>  | Jaringan <i>offshore pipelines</i> .....   | 7  |
| <b>Gambar 2.2</b>  | <i>Free span</i> .....   | 8  |
| <b>Gambar 2.3</b>  | <i>Free span</i> pada <i>offshore pipeline</i> .....   | 10 |
| <b>Gambar 2.4</b>  | <i>Scouring</i> pada permukaan dasar laut.....   | 10 |
| <b>Gambar 2.5</b>  | Sketsa <i>crossing pipeline</i> .....  | 11 |
| <b>Gambar 2.6</b>  | Fenomena <i>VIV</i> pada <i>pipeline</i> .....   | 11 |
| <b>Gambar 2.7</b>  | <i>Span</i> statik .....   | 12 |
| <b>Gambar 2.8</b>  | Grafik <i>Region of Validity of Wave Theories</i> .....  | 15 |
| <b>Gambar 2.9</b>  | Tegangan longitudinal pada dinding pipa akibat momen <i>bending</i><br>.....                       | 20 |
| <b>Gambar 2.10</b> | Ilustrasi tekanan internal ( $P_i$ ) dan tekanan eksternal ( $P_e$ ) pada pipa<br>bawah laut ..... | 22 |
| <b>Gambar 2.11</b> | Ilustrasi <i>thermal stress</i> .....  | 24 |
| <b>Gambar 2.12</b> | Ilustrasi tegangan longitudinal pada pipa .....  | 25 |
| <b>Gambar 2.13</b> | Jenis-jenis umum <i>propagation buckling</i> .....   | 29 |
| <b>Gambar 2.14</b> | Kurva tegangan-regangan baja struktural .....  | 32 |
| <b>Gambar 2.15</b> | Contoh gambar <i>solid elements</i> dengan <i>nodes</i> .....                                      | 34 |
| <b>Gambar 3.1</b>  | Diagram alir pengerjaan tugas akhir.....   | 35 |
| <b>Gambar 3.2</b>  | Metodologi perhitungan panjang <i>free span</i> statik .....                                       | 36 |
| <b>Gambar 3.3</b>  | Metodologi analisis tegangan dan kriteria <i>ASD</i> pada pipa bawah<br>laut .....                 | 38 |
| <b>Gambar 3.4</b>  | Metodologi analisis kriteria <i>global buckling</i> pada pipa bawah laut<br>.....                  | 40 |
| <b>Gambar 3.5</b>  | Metodologi analisis <i>incremental load</i> .....  | 41 |
| <b>Gambar 4.1</b>  | Peta jalur <i>offshore pipeline SSWJ project phase II</i> .....                                    | 49 |
| <b>Gambar 4.2</b>  | Pembagian zona pada jalur pipa transmisi Sumatera-Jawa .....                                       | 50 |
| <b>Gambar 4.3</b>  | Profil <i>seabed</i> dari jalur yang dilewati <i>offshore pipeline</i> .....                       | 50 |
| <b>Gambar 4.4</b>  | Profil <i>span #35</i> .....   | 51 |

|                    |   |    |
|--------------------|---|----|
| <b>Gambar 4.5</b>  | Hasil perhitungan penentuan teori gelombang .....   | 55 |
| <b>Gambar 4.6</b>  | Hasil pemodelan dengan <i>solid elements</i> disertai <i>meshing</i> .....  | 68 |
| <b>Gambar 4.7</b>  | Hasil pemodelan <i>equivalent stress</i> pada saat struktur mengalami beban <i>ultimate</i> .....                       | 68 |
| <b>Gambar 4.8</b>  | Titik lokasi saat terjadinya <i>equivalent stress</i> maksimum pada saat struktur mengalami beban <i>ultimate</i> ..... | 69 |
| <b>Gambar 4.9</b>  | Hasil pemodelan <i>displacement</i> pada saat struktur mengalami beban <i>ultimate</i> .....                            | 69 |
| <b>Gambar 4.10</b> | Titik lokasi saat terjadinya <i>displacement</i> maksimum pada saat struktur mengalami beban <i>ultimate</i> .....      | 70 |
| <b>Gambar 4.11</b> | Grafik hubungan antara <i>stress</i> dan <i>strain</i> .....  | 70 |
| <b>Gambar 4.12</b> | Grafik hubungan antara beban total dan <i>displacement</i> .....  | 71 |

## DAFTAR NOTASI

|              |  |
|--------------|--|
| $A_e$        | = Luas permukaan luar penampang melintang pipa, (m <sup>2</sup> )  |
| $A_i$        | = Luas permukaan dalam penampang melintang pipa, (m <sup>2</sup> ) |
| $A_s$        | = Luas penampang pipa, (m <sup>2</sup> )                           |
| $C$          | = Konstanta kondisi batas perletakan                               |
| $C_D$        | = Koefisien <i>drag</i>  |
| $C_L$        | = Koefisien <i>lift</i>  |
| $C_M$        | = Koefisien inersia  |
| $d$          | = Kedalaman perairan, (m)  |
| $D$          | = Diameter pipa, (m)   |
| $D_{max}$    | = Diameter pipa terbesar yang diukur, (m)                          |
| $D_{min}$    | = Diameter pipa terkecil yang diukur, (m)                          |
| $D_{tcc}$    | = Tebal dinding ( <i>coating+concrete</i> ), (m)                   |
| $E$          | = Modulus elastisitas baja, (Pa)                                   |
| $F_D$        | = <i>Drag force</i> , (N)  |
| $F_H$        | = Beban hidrodinamik, (N/m)  |
| $F_I$        | = <i>Inertia force</i> , (N)                                       |
| $F_\theta$   | = Gaya tangensial, (N)   |
| $f_{cb}$     | = <i>Minimum</i> [ $f_y$ ; $\frac{f_u}{1,15}$ ]                    |
| $f_o$        | = Ovalisasi  |
| $f_u$        | = <i>Characteristic ultimate strength</i> , (Pa)                   |
| $f_y$        | = <i>Characteristic yield stress</i> , (Pa)                        |
| $f_{y,temp}$ | = <i>Derating strength value due to temperature</i> , (Pa)         |
| $g$          | = Percepatan gravitasi, (m/s <sup>2</sup> )                        |
| $H$          | = Ketinggian gelombang pada titik yang ditinjau, (m)               |
| $h$          | = Jarak antara titik referensi dengan permukaan air laut, (m)      |
| $I$          | = Momen inersia, (m <sup>4</sup> )                                 |
| $ID$         | = <i>Inside diameter</i> , (m)                                     |
| $k$          | = Angka gelombang  |
| $L$          | = Panjang gelombang, (m)   |



|               |  |
|---------------|--|
| $L_p$         | = Panjang <i>span</i> , (m)  |
| $M$           | = Momen lentur, (Nm)   |
| $M_B$         | = Momen tekuk statik maksimum, (Nm)                                  |
| $M_p(t_2)$    | = Tahanan momen plastis, (Nm)  |
| $M_{sd}$      | = <i>Design bending moment</i> , (Nm)                                |
| $OD$          | = <i>Outside diameter</i> , (m)                                      |
| $P$           | = Resultan tekanan yang mengelilingi pipa, (Pa)                      |
| $P_b(t)$      | = <i>Pressure containment</i> , (Pa)                                 |
| $P_c$         | = Karakteristik tekanan <i>collapse</i> , (Pa)                       |
| $P_d$         | = <i>Pressure design</i> , (Pa)                                      |
| $P_e$         | = Tekanan eksternal, (Pa)  |
| $P_{el}$      | = Tekanan <i>collapse</i> elastis, (Pa)                              |
| $P_i$         | = Tekanan internal, (Pa)   |
| $P_{li}$      | = Tekanan lokal insidental, (Pa)                                     |
| $P_{min}$     | = Tekanan internal minimum, (Pa)                                     |
| $P_p$         | = Tekanan <i>collapse</i> plastis, (Pa)                              |
| $P_{pr}$      | = <i>Propagation buckling</i> , (Pa)                                 |
| $q$           | = Beban total pipa, (N/m)  |
| $r$           | = Selisih antara diameter terluar dengan ketebalan dinding pipa, (m) |
| $Re$          | = <i>Reynolds number</i>   |
| $s$           | = Jarak vertikal titik yang ditinjau dari dasar laut, (m)            |
| $S_{eff}$     | = Gaya aksial efektif, (N)   |
| $SMTS$        | = <i>Specified Minimum Tensile Strength</i> , (Pa)                   |
| $SMYS$        | = <i>Specified Minimum Yield Stress</i> , (Pa)                       |
| $S_p(t_2)$    | = Karakteristik tahanan gaya aksial plastis, (N)                     |
| $S_{sd}(p_i)$ | = Gaya aksial efektif desain, (N)                                    |
| $T$           | = Periode gelombang, (s)   |
| $T_{max}$     | = <i>Maximum Design Temperature</i> , (°C)                           |
| $T_{min}$     | = <i>Installation Temperature</i> , (°C)                             |
| $t_{CA}$      | = <i>Corrosion allowance</i> , (m)                                   |
| $t_{cc}$      | = Tebal selimut beton, (m)   |

|                |  |
|----------------|--|
| $t$            | = Waktu yang ditempuh untuk mencapai jarak horizontal titik yang ditinjau, (s) |
| $t_{corr}$     | = Tebal lapisan anti korosi, (m)   |
| $U$            | = Kecepatan horizontal partikel air, (m/s)                                     |
| $U_c$          | = Kecepatan partikel arus efektif, (m/s)                                       |
| $U_D$          | = Kecepatan partikel arus, (m/s)   |
| $U_e$          | = Kecepatan arus dan gelombang efektif, (m/s)                                  |
| $U_{eff}$      | = kecepatan efektif partikel air pada ketinggian $y_o$ , (m/s)                 |
| $U_o$          | = kecepatan horizontal partikel air yang diketahui pada $y_o$ , (m/s)          |
| $U_r$          | = kecepatan arus stabil, (m/s)   |
| $U_w$          | = Kecepatan partikel gelombang efektif, (m/s)                                  |
| $\nu$          | = <i>Poisson ratio</i>   |
| $W$            | = Beban terdistribusi merata, (N/m)  |
| $W_{buoy}$     | = Berat gaya apung, (N/m)  |
| $W_{cc}$       | = Berat selimut beton, (N/m)   |
| $W_{cont}$     | = Berat isi pipa, (N/m)  |
| $W_{corr}$     | = Berat lapisan anti korosi, (N/m)   |
| $W_{st}$       | = Berat pipa baja, (N/m)   |
| $W_{sub}$      | = Beban pipa terendam, (N/m)   |
| $WT$           | = <i>Wall thickness</i> , (m)  |
| $x$            | = Jarak horizontal titik yang ditinjau, (m)                                    |
| $y$            | = kedalaman titik yang ditinjau dari permukaan laut, (m)                       |
| $y_o$          | = Ketinggian orbit partikel dari dasar laut, (m)                               |
| $y_{pipe}$     | = <i>Height of pipe above seabed</i> , (m)                                     |
| $Z_o$          | = faktor kekasaran <i>seabed</i> , (m)   |
| $Z_r$          | = ketinggian arus di atas <i>seabed</i> , (m)                                  |
| $\alpha_c$     | = <i>Flow stress parameter</i>   |
| $\alpha_{fab}$ | = Faktor fabrikasi   |
| $\alpha_p$     | = Faktor tekanan untuk <i>combined loading criteria</i>                        |
| $\alpha_T$     | = Koefisien <i>thermal expansion</i> , (C <sup>-1</sup> )                      |
| $\alpha_u$     | = <i>Material strength factor</i>  |
| $\beta$        | = <i>Combined loading criteria factor</i>                                      |

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| $\eta$                          | = Usage factor  |
| $\rho$                          | = Densitas air laut, (N/m <sup>3</sup> )                              |
| $\rho_{cc}$                     | = Densitas selimut beton, (N/m <sup>3</sup> )                         |
| $\rho_{cont}$                   | = Densitas fluida dalam pipa, (N/m <sup>3</sup> )                     |
| $\rho_{corr}$                   | = Densitas lapisan anti korosi, (N/m <sup>3</sup> )                   |
| $\rho_s$                        | = Densitas baja, (N/m <sup>3</sup> )                                  |
| $\tau_x$                        | = Tegangan geser tangensial, (Pa)                                     |
| $\nu$                           | = Viskositas kinematis air, (m <sup>2</sup> /s)                       |
| $\gamma_m$                      | = Material resistance factor  |
| $\gamma_{inc}$                  | = Incidental to design pressure ratios                                |
| $\gamma_{SC}$                   | = Safety class resistance factor                                      |
| $\omega$                        | = Frekuensi gelombang, (rad/s)  |
| $\sigma_b$                      | = Tegangan longitudinal akibat momen lentur, (N/m <sup>2</sup> )      |
| $\sigma_E$                      | = Equivalent stress, (Pa)   |
| $\sigma_{ep}$                   | = End cap effect stress, (Pa)   |
| $\sigma_H$                      | = Hoop stress, (Pa)   |
| $\sigma_i$                      | = Tegangan longitudinal akibat beda tekanan, (N/m <sup>2</sup> )      |
| $\sigma_L$                      | = Longitudinal stress, (Pa)   |
| $\sigma_p$                      | = Poisson stress, (Pa)  |
| $\sigma_T$                      | = Thermal stress, (Pa)  |
| $\pi$                           | = phi   |
| $\theta$                        | = Sudut fase (°)  |
| $\Delta T$                      | = Perbedaan temperatur antara kondisi instalasi dan operasional, (C°) |
| $\frac{\partial u}{\partial t}$ | = percepatan horizontal partikel air, (m/s <sup>2</sup> )             |

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Gas bumi merupakan salah satu Sumber Daya Alam (SDA) yang memiliki peranan penting bagi Indonesia saat ini hingga masa mendatang. Selain menjadi sumber energi, gas bumi pada umumnya juga digunakan sebagai bahan baku oleh berbagai kalangan industri dalam proses produksinya. Gas bumi memiliki potensi yang cukup besar untuk dikembangkan di Indonesia, sehingga hal ini menjadi tanggung jawab besar bagi pemerintah dan semua pelaku industri khususnya yang bergerak di bidang gas bumi untuk mampu mengoptimalkan dan memaksimalkan potensi gas bumi tersebut.



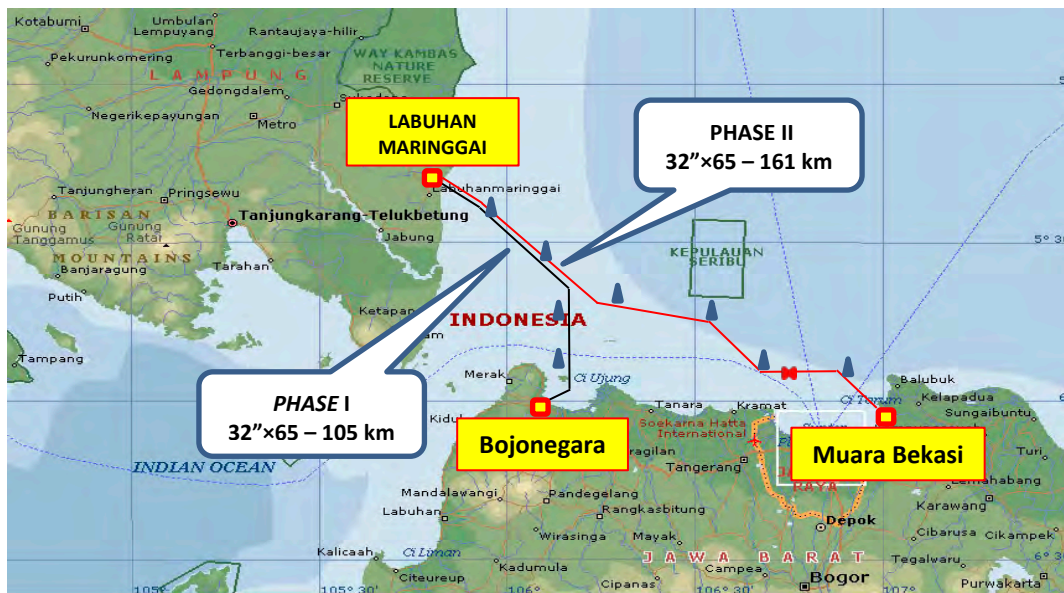
Gambar 1.1 Peta potensi cadangan gas bumi di Indonesia (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi, 2010)

PT. Perusahaan Gas Negara (Persero), Tbk merupakan salah satu Badan Usaha Milik Negara (BUMN) yang bergerak di bidang penyediaan tenaga dan industri gas yang berperan dalam meningkatkan derajat kehidupan masyarakat umum, khususnya masyarakat Indonesia dalam memanfaatkan sumber energi gas. Oleh

karena itu, demi tercapainya kesejahteraan dan kepuasan hidup masyarakat khususnya para konsumen, PGN memiliki kewajiban untuk memberikan pelayanan yang terbaik dalam segala kegiatan industrinya termasuk menjaga kualitas dari produk yang dihasilkan. Serta mampu menjamin segala proses perancangan, fabrikasi, instalasi, hingga proses operasinya agar dapat terlaksana dengan baik dan benar guna mencapai kesuksesan dari segi keamanan, kehandalan, dan keefisienan dalam menyelesaikan sebuah pekerjaan.

Dewasa ini, penggunaan jaringan pipa bawah laut sebagai moda transportasi dan distribusi sudah mulai berkembang di berbagai kalangan industri khususnya di bidang minyak dan gas bumi. Jaringan pipa bawah laut dianggap lebih praktis karena mempunyai biaya operasional dan perawatan yang rendah ditambah dengan usia operasional yang relatif panjang, namun mempunyai kekurangan yaitu biaya pembangunan awalnya yang sangat besar (Puspitasari, 2008). Maka dari itu, kebanyakan kalangan industri minyak dan gas sekarang lebih memilih menggunakan jaringan pipa bawah laut dan mulai menggeser peran dari kapal tanker ataupun truk pengangkut minyak dan gas bumi dalam mendistribusikan produknya tersebut. Mengingat juga jarak yang harus dijangkau relatif jauh, maka penggunaan pipa bawah laut berguna untuk menambah tingkat keamanan dan keselamatan baik bagi pekerja maupun produknya.

PT. PGN *Strategic Business Unit (SBU)* Transmisi Sumatera Jawa adalah salah satu unit usaha yang dimiliki oleh PGN pusat yang berfungsi untuk mentransmisikan gas. Unit ini merupakan satu dari sekian banyak pelaku industri gas yang menggunakan teknologi pipa bawah laut (*subsea pipeline*) dalam mendistribusikan dan mentransmisikan hasil produknya tersebut. Perusahaan ini memiliki dua pipa penyalur (transmisi) yang mengalirkan gas dari Lampung (Labuhan Maringgai) ke dua daerah di Pulau Jawa, yaitu Muara Bekasi dan Bojonegara. Pipa transmisi gas dari Labuhan Maringgai ke Muara Bekasi memiliki panjang sekitar 161 km dengan spesifikasi pipa 32"×65 1150 *psig*. Sedangkan pipa yang mengalir ke Bojonegara memiliki panjang 105 km dengan spesifikasi 32"×65 1150 *psig*.



Gambar 1.2 Jalur pipa transmisi PT. PGN Persero Tbk., SBU TSJ (PT. Perusahaan Gas Negara (Persero) Tbk, 2005)

Kondisi geografis berupa lautan yang cukup panjang dan membentang dari Pulau Sumatera hingga Pulau Jawa disertai dengan kondisi *seabed* yang tidak merata menjadi permasalahan khusus dalam melakukan perhitungan dan perancangan jaringan pipa bawah laut. Kondisi *seabed* yang tidak merata tersebut dapat menyebabkan bentangan pipa menggantung dikarenakan pipa tidak menumpu pada dasar laut (*free span*). Jika bentangan tersebut terlalu panjang dan melebihi batas yang diizinkan, maka akan beresiko mengalami kegagalan struktur pada pipa. Berdasarkan kondisi tersebut, maka dibutuhkan penyempurnaan perencanaan teknis dan pelaksanaan konstruksi jaringan pipa bawah laut untuk menyesuaikan dengan kondisi alam laut pada lokasi tersebut, dan tentunya optimasi biaya dan peningkatan tingkat keselamatan bagi sistem jaringan pipa transmisi gas tersebut (Pratama, 2007).

Kerusakan atau kegagalan struktur pada pipa bawah laut yang diakibatkan oleh *free span* dapat terjadi dalam dua mekanisme yang berbeda. Jenis kerusakan yang pertama adalah munculnya tegangan akibat *bending* yang berlebih karena beban hidrodinamis dan berat pipa itu sendiri (statis). Sedangkan untuk jenis kerusakan yang kedua adalah akibat adanya gaya-gaya siklis dalam kurun waktu panjang

yang menimpa struktur pipa bawah laut sehingga terjadi kelelahan (*fatigue*) pada struktur pipa tersebut (dinamis).

*Ultimate Limit State (ULS)* merupakan suatu kondisi batas kekuatan pipa untuk mampu menahan gaya internal maupun gaya eksternal yang terjadi pada pipa bawah laut. Analisis ini juga merupakan syarat kekuatan pipa untuk mampu menahan gaya-gaya yang bekerja terhadap *buckling* atau dengan kata lain merupakan analisis mekanika teknik secara statis. Kriteria *ULS* ini mengacu pada *standard code* yang telah ditetapkan yaitu DNV RP F105 : *Free Spanning Pipelines* 2006. Sedangkan detail penjelasan tentang kriteria *ULS* dijelaskan pada DNV OS F101 : *Submarine Pipeline System* 2012. Sedangkan untuk kriteria *ultimate strength* mengacu pada ABS : *Commentary on the Guide-Buckling and Ultimate Strength Assesment for Offshore Structures* 2005.

## 1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah dari tugas akhir ini adalah :

1. Berapakah panjang *free span* yang diizinkan pada pipa bawah laut yang dianalisa secara statis?
2. Apakah tegangan-tegangan yang terjadi pada pipa bawah laut telah memenuhi syarat kriteria sesuai dengan konsep *Allowable Stress Design (ASD)* yang mengacu pada DNV OS F101 : *Submarine Pipeline System* 2012?
3. Apakah *global buckling* telah memenuhi kriteria sesuai dengan acuan DNV OS F101 : *Submarine Pipeline System* 2012?
4. Dengan menggunakan metode *incremental load*, pada tahap peningkatan ke berapakah tegangan pada struktur pipa bawah laut melebihi batas *ultimate* sesuai dengan aturan pada ABS 2005?

## 1.3 Tujuan

Dari perumusan masalah di atas, tujuan yang ingin dicapai dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui panjang *free span* yang diizinkan pada pipa bawah laut yang dianalisa secara statis.

2. Mengetahui apakah tegangan-tegangan yang terjadi pada pipa bawah laut telah memenuhi syarat kriteria sesuai dengan konsep *Allowable Stress Design (ASD)* yang mengacu pada DNV OS F101 : *Submarine Pipeline System* 2012.
3. Mengetahui apakah *global buckling* telah memenuhi kriteria sesuai dengan acuan DNV OS F101 : *Submarine Pipeline System* 2012.
4. Mengetahui pada tahap peningkatan ke berapakah tegangan pada struktur pipa bawah laut melebihi batas *ultimate*-nya dengan menggunakan metode *incremental load* sesuai dengan aturan pada ABS 2005.

#### 1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Jaringan *offshore pipeline* yang dianalisa adalah jaringan pipa milik PT. Perusahaan Gas Negara (Persero) Tbk. dengan studi kasus : *South Sumatera-West Java Gas Pipeline Project Phase II* Labuhan Maringgai-Muara Bekasi *Offshore Pipeline*.
2. Jaringan pipa bawah laut diketahui dalam kondisi *free span* dan *span* yang dianalisa adalah *span #35* pada *Kilometer Point 112,3 – 112,5*.
3. Analisis dilakukan dengan menggunakan metode analisis *free span* secara statis tanpa melakukan analisis secara dinamis.
4. Tumpuan pada masing-masing ujung pipa bawah laut diasumsikan berupa tumpuan *pinned roll-pinned*.
5. Besar tegangan geser tangensial ( $\tau_x$ ) diabaikan.
6. Tekanan internal minimum untuk kasus pipa bawah laut pada tugas akhir ini bernilai nol.
7. *Maximum Fabrication Factor* ( $\alpha_{fab}$ ) diasumsikan *seamless*.
8. Tegangan yang diperhitungkan dalam perhitungan *incremental load* adalah *equivalent* atau *von mises stress* dengan meng-increment kecepatan arus dan gelombang efektif.

#### 1.5 Manfaat

Manfaat dari analisis pada tugas akhir ini adalah untuk mengetahui panjang *free span* yang diizinkan pada pipa bawah laut yang dianalisa secara statis serta



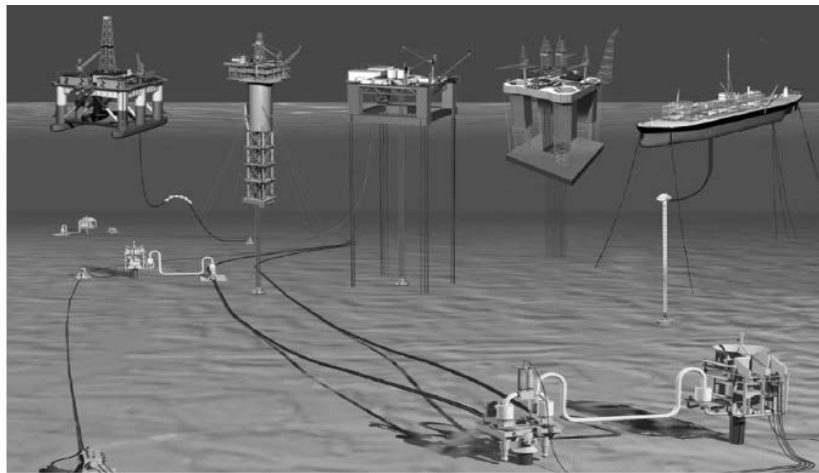
mengetahui hasil pengecekan apakah tegangan-tegangan dan *global buckling* yang terjadi pada pipa bawah laut tersebut telah memenuhi syarat batas *Ultimate Limit State (ULS)* sesuai dengan DNV OS F101 : *Submarine Pipeline System* 2012. Manfaat selanjutnya adalah mengetahui pada tahap peningkatan ke berapakah tegangan pada struktur pipa bawah laut melebihi batas *ultimate*-nya dengan menggunakan metode *incremental load* yang sesuai dengan aturan pada ABS 2005.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

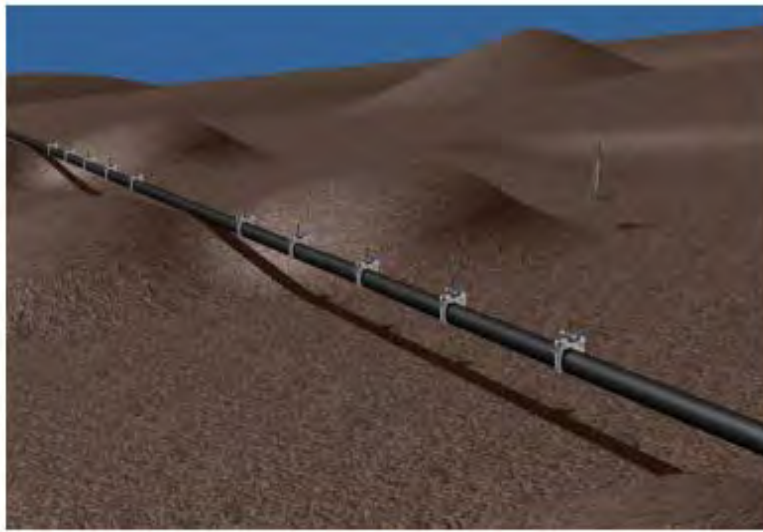
#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Jaringan pipa merupakan moda transportasi yang sangat efisien dan ekonomis yang mampu mengalirkan fluida dari satu tempat ke tempat yang lainnya. *Subsea pipeline* atau yang biasa juga disebut dengan *offshore pipeline* merupakan jaringan pipa yang terpasang di bawah laut yang memiliki fungsi sebagai alat untuk menyalurkan produk dengan jarak yang umumnya relatif cukup jauh serta menjangkau antar pulau.



Gambar 2.1 Jaringan *offshore pipelines* (Soegiono, 2007)

Suatu fenomena alam yang terjadi di dasar laut dan merupakan salah satu faktor yang sangat penting serta erat kaitannya dengan pipa bawah laut adalah *free span*. Fenomena *free span* terjadi akibat ketidak rataan (*uneven*) permukaan dasar laut dengan kurvatur yang tidak memenuhi kurvatur natural dari pipa bawah laut sehingga bentang pipa akan menggantung. Selain itu, *free span* juga dapat terjadi jika pada rute pipa tersebut memiliki persimpangan (*crossing*) dengan pipa atau kabel lain di bawah laut (Puspitasari, 2008). Kondisi *free span* tersebut sangat beresiko terhadap kekuatan dan ketahanan struktur jaringan pipa bawah laut baik selama kondisi *hydrotest* maupun operasi. Faktor penyebab terbentuknya *free span* tidak bisa dikendalikan secara mutlak karena merupakan faktor alam yang terjadi di dasar laut.



Gambar 2.2 *Free span* (Navaro, 2010)

Apabila terjadi sebuah kondisi *free span* pada pipa bawah laut seperti gambar di atas, maka hal pertama yang perlu dilakukan adalah melakukan pengecekan terhadap kekuatan struktur pipa tersebut mengingat keadaan pipa yang menggantung bebas dan tidak memiliki tumpuan. Metode analisis pada *free span* dibagi menjadi dua bagian yakni analisis tegangan awal dan cek frekuensi getaran, kemudian diikuti oleh analisis regangan serta analisis kelelahan apabila diperlukan. Dalam buku *offshore pipeline* (Guo et.al, 2005) mengatakan bahwa resiko kerusakan pada *free span* pipa dapat terjadi dalam dua mekanisme yang terpisah, yang pertama adalah akibat *bending* yang berlebihan karena beban hidrodinamis dan berat pipa itu sendiri, atau kerusakan akibat *fatigue* dalam kurun waktu panjang. Analisis pada *free span* akan menghasilkan panjang *free span* yang diizinkan agar tegangan yang terjadi pada *free span* tidak melebihi tegangan *yield* material pipa.

Besar defleksi, dampak gaya hidrodinamika, vibrasi, dan tegangan maksimum yang terjadi harus dihitung untuk pengecekan kemungkinan kegagalan pipa dengan pola statik (*Ultimate Limit Strength*) atau kelelahan/*fatigue* (*Fatigue Limit Strength*) (Pratama, 2007). Dalam tugas akhir ini, metode pengecekan kekuatan struktur pipa bawah laut hanya dibatasi dengan metode pengecekan dengan pola statis tanpa melakukan pengecekan terhadap kelelahan/*fatigue* (dinamis).

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Pipa Bawah Laut (*Offshore Pipelines*)

Pipa bawah laut merupakan hasil perkembangan dari kemajuan teknologi zaman ini yang telah banyak dimanfaatkan oleh berbagai kalangan industri khususnya yang bergerak di bidang minyak dan gas. Pipa bawah laut tersebut digunakan untuk transportasi fluida seperti minyak, gas, atau air dalam jumlah besar dengan jarak yang cukup jauh melalui laut atau daerah di lepas pantai. *Offshore pipelines* terutama dipergunakan untuk mengangkut produk hidrokarbon dari lapangan di lepas pantai (*offshore fields*) ke pemakai di darat (Soegiono, 2007).

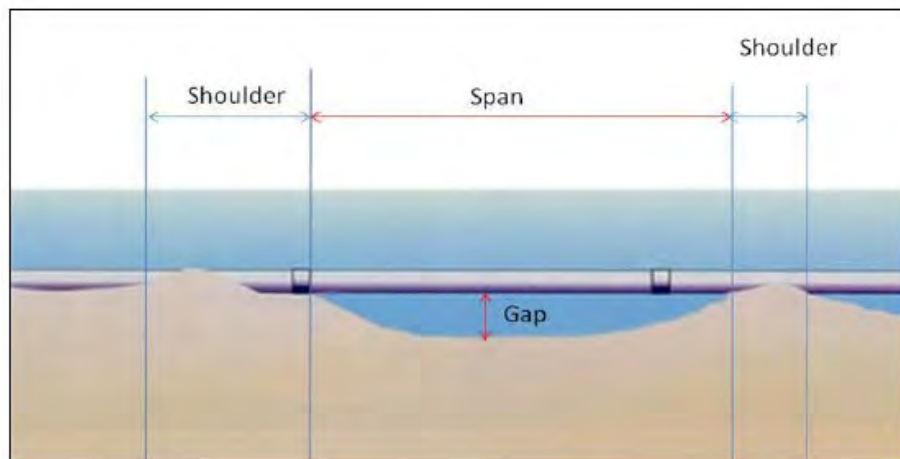
Dalam perencanaan dan perancangan pipa bawah laut, terdapat berbagai analisis yang harus dilakukan guna menunjang keselamatan dan kehandalan struktur pipa. Analisis tersebut diantaranya : analisis ketebalan dinding pipa (*wall thickness*), analisis stabilitas pipa (*on bottom stability*), analisis *thermal expansion*, analisis *buckling*, analisis *fatigue*, serta *cathodic protection*. Dari berbagai macam analisis yang ada, semuanya telah diatur dalam *standard code* yang dibuat oleh suatu instansi atau lembaga dan disana juga memberikan berbagai parameter, langkah-langkah, serta syarat-syarat dalam melakukan analisis perhitungan. *Standard code* inilah yang dijadikan pedoman bagi para *engineer* khususnya untuk mengambil keputusan dalam mengerjakan sebuah proyek.

Langkah awal dalam mendesain suatu jaringan pipa bawah laut adalah melakukan pemilihan rute yang akan dilewati oleh jalur pipa tersebut (*routing*). Tentu dalam pemilihan rute ini terdapat faktor-faktor yang harus diperhatikan dan diperhitungkan. Faktor-faktor tersebut antara lain :

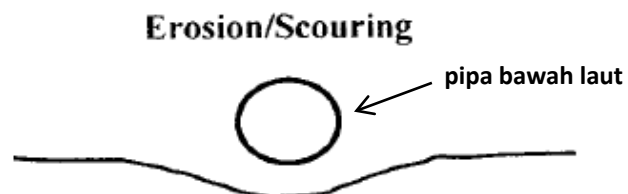
- 1) Memilih rute yang memiliki jarak paling pendek. Hal ini sangat berkaitan dengan efisiensi dari segi biaya produksi dan instalasi.
- 2) Rute yang dipilih harus memudahkan proses instalasi sehingga mampu mempercepat pekerjaan.
- 3) Memiliki resiko bahaya yang sangat kecil.
- 4) Menghindari jalur pipa yang tidak tertumpu ketika diletakkan di dasar laut (*free span*).

### 2.2.2 Free Span

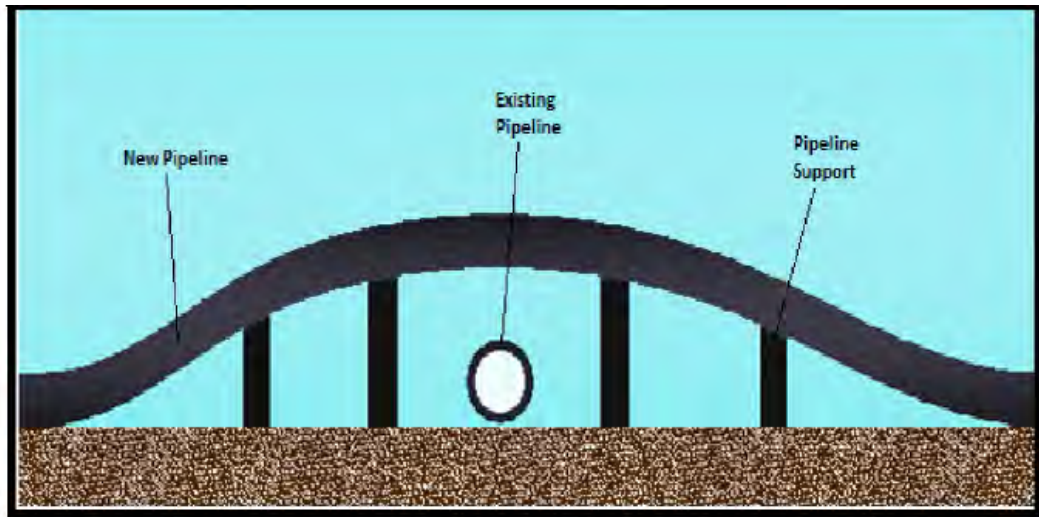
*Free span* merupakan sebuah kondisi dimana pipa bawah laut tidak memiliki tumpuan sehingga kondisi pipa tersebut menggantung bebas. Hal ini bisa disebabkan karena memang kondisi *seabed* yang tidak merata, adanya *scouring*, serta adanya persimpangan (*crossing pipeline*) yang mengharuskan pipa bawah laut harus ditumpu oleh *support* buatan. Berdasarkan kondisi *free span* tersebut, maka dibutuhkan suatu analisis untuk melakukan pengecekan apakah struktur pipa masih dalam kondisi aman atau tidak. Struktur pipa harus bisa melawan gaya-gaya yang bekerja yang mengenai pipa tersebut, sehingga resiko kegagalan struktur pipa dapat diantisipasi. Ada pun jenis gaya-gaya yang dimaksud antara lain : *excessive yielding*, *ovalization*, *buckling*, dan *fatigue*.



Gambar 2.3 *Free span* pada *offshore pipeline* (Airlangga, 2010)

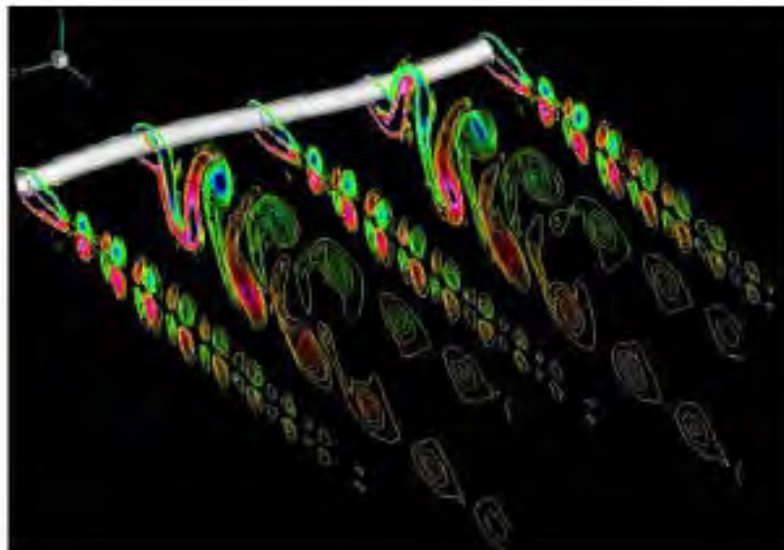


Gambar 2.4 *Scouring* pada permukaan dasar laut (Arif, 2008)



Gambar 2.5 Sketsa *crossing pipeline* (Tawekal, 2010)

Ketika terjadi *free span*, pipa secara statis akan mengalami defleksi akibat dari beban pipa itu sendiri dan jika besar defleksi melebihi batas tegangan leleh pipa, maka akan terjadi *buckling* dan menyebabkan kegagalan pada struktur pipa bawah laut tersebut. Sedangkan secara dinamis, pipa akan mengalami vibrasi akibat gaya hidrodinamika yang bekerja pada bentang *free span* pipa. Istilah vibrasi secara dinamis pada kasus tersebut lebih dikenal dengan istilah *Vortex Induction Vibration (VIV)* dimana hal ini dapat menyebabkan kegagalan struktur pipa yang diakibatkan oleh kelelahan struktur (*fatigue*).



Gambar 2.6 Fenomena *VIV* pada *pipeline* (Arif, 2008)

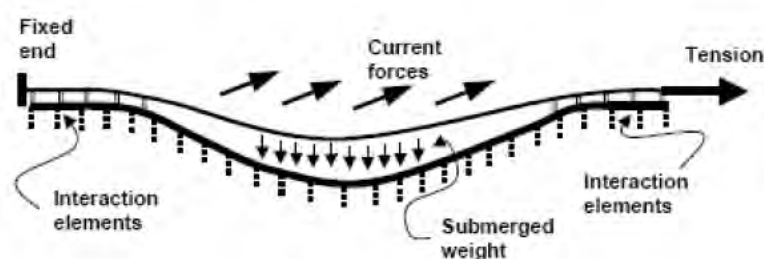
*Free span* memiliki batas panjang yang diizinkan dimana batas tersebut telah diatur dalam *standard code* yang dijadikan pedoman dalam pengambilan keputusan. Panjang *free span* yang diizinkan dibagi menjadi dua kriteria yaitu panjang *free span* statik dan dinamik. Panjang *span* statik dipengaruhi oleh tegangan yang terjadi karena berat pipa di bawah laut (*submerged weight*), tekanan, dan tumpuan. Sedangkan panjang *span* dinamik dipengaruhi oleh fenomena getaran yang muncul akibat adanya gaya hidrodinamika yang mengenai struktur pipa bawah laut (*VIV*).

### 2.3 Analisis *Ultimate Limit State* (ULS)

Analisis kriteria *Ultimate Limit State* (ULS) ini merupakan pengecekan kondisi batas pada kekuatan struktur pipa bawah laut terhadap gaya internal dan gaya eksternal yang mengenai pipa tersebut. Pengecekan yang dilakukan pada umumnya terdiri dari dua hal yaitu pengecekan terhadap tegangan-tegangan yang terjadi pada pipa dan *buckling*. Sebelum menganalisa tegangan dan *buckling*, panjang *free span* statik juga perlu diketahui dikarenakan parameter-parameter untuk masing-masing analisis saling berhubungan.

#### 2.3.1 Analisis *Free Span* Statik pada Pipa Bawah Laut

Analisis *free span* pipa bawah laut dilakukan pada dua kriteria utama yakni *Fatigue Limit State* (FLS) dan *Ultimate Limit State* (ULS) dimana masing-masing dilakukan dalam kondisi berbeda yaitu *FLS* pada kondisi dinamis dan *ULS* pada kondisi statis. Kedua analisis tersebut sangatlah penting karena secara statis pipa dapat mengalami defleksi yang dapat menyebabkan keruntuhan leleh sedangkan secara dinamis pipa akan mengalami getaran yang dapat beresiko kegagalan karena pipa mengalami kelelahan/*fatigue*.



Gambar 2.7 *Span* statik (Arif, 2008)

*Free span* merupakan sebuah kondisi pada pipa bawah laut yang memiliki bentangan bebas diantara dua tumpuan pada kedua ujung pipa. Pada kondisi bentang bebas tersebut tentunya terjadi tegangan cukup besar yang diakibatkan massa pipa yang tidak tertumpu oleh dasar laut (*seabed*). Bentang bebas jika terlalu panjang dapat mengakibatkan tegangan berlebihan yang dapat membahayakan struktur pipa tersebut. Tegangan yang terjadi baik itu kombinasi ataupun longitudinal dibatasi oleh faktor *Specified Minimum Yield Strength (SMYS)* seperti tabel di bawah ini :

Tabel 2.1 Tegangan yang Dizinkan pada *Offshore Pipelines* (Arif, 2008)

| Kondisi   | % of SMYS |
|---|-----------|
| <i>Longitudinal Stress</i>                          | 80        |
| <i>Combined Stress (Installation and Hydrotest)</i> | 90        |
| <i>Combined Stress (Operation)</i>                  | 90        |

Model yang digunakan untuk perhitungan *free span* statik adalah *simple beam* yang ditumpu dimana pada kedua ujungnya diasumsikan berupa tumpuan *pinned roll-pinned*. Parameter-parameter yang digunakan dalam melakukan perhitungan *span* statik ini adalah sebagai berikut :

### 2.3.1.1 Momen Lentur

Untuk perhitungan momen lentur ( $M$ ) pada struktur pipa bawah laut dimana hal ini telah diasumsikan sebagai *simple beam* yang mempunyai beban terdistribusi merata dengan tumpuan *pinned roll-pinned*, maka sesuai dengan teori mekanika teknik, perhitungan tersebut dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$M = \frac{W \cdot L_p^2}{8} \quad (2.1)$$

dengan :  $W$  = beban terdistribusi merata, (N/m)

$L_p$  = panjang *span*, (m)



### 2.3.1.2 Beban Terdistribusi Merata

Beban yang bekerja pada pipa merupakan resultan dari berat pipa terendam (*submerged weight*) dan beban hidrodinamik yang bekerja saling tegak lurus satu sama lain. Beban terdistribusi merata ( $W$ ) dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$W = \sqrt{F_H^2 + W_{sub}^2} \quad (2.2)$$

dengan :  $F_H$  = beban hidrodinamik, (N/m)

$W_{sub}$  = beban pipa terendam, (N/m)

Untuk memperoleh nilai dari beban hidrodinamik ( $F_H$ ) adalah dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$F_H = F_D + F_I \quad (2.3)$$

dengan :  $F_D$  = *drag force*, (N)

$$= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_e^2 \cdot D \cdot C_D \quad (2.4)$$

$\rho$  = densitas air laut, (N/m<sup>3</sup>)

$U_e$  = kecepatan arus dan gelombang efektif, (m/s)

$D$  = diameter pipa, (m)

$C_D$  = koefisien *drag*

$F_I$  = *inertia force*, (N)

$$= \rho \cdot C_M \cdot \left( \frac{\pi D^2}{4} \right) \cdot \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (2.5)$$

$C_M$  = koefisien inersia

$\pi$  = *phi*, bernilai 3,14

$\frac{\partial u}{\partial t}$  = percepatan horizontal partikel air, (m/s<sup>2</sup>)

Untuk mendapatkan nilai dari kecepatan arus dan gelombang efektif ( $U_e$ ), maka digunakan perhitungan teori gelombang linier guna menentukan

teori gelombang mana yang akan dipakai. Langkah awal dari penentuan teori gelombang tersebut adalah dengan melakukan perhitungan :

$$\left[ \frac{H}{gT^2} \right] \text{ dan } \left[ \frac{d}{gT^2} \right] \quad (2.6)$$

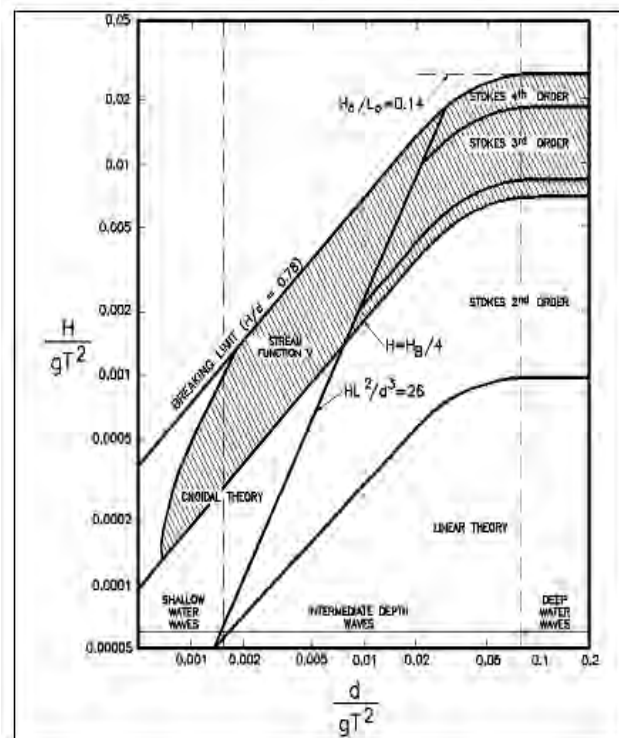
dengan :  $H$  = ketinggian gelombang pada titik yang ditinjau, (m)

$d$  = kedalaman perairan, (m)

$g$  = percepatan gravitasi, (m/s<sup>2</sup>)

$T$  = periode gelombang, (s)

Hasil dari perhitungan persamaan di atas kemudian digunakan untuk melakukan penarikan garis lurus pada grafik daerah aplikasi teori gelombang *Regions of Validity of Wave Theories*, sehingga garis tersebut akan berpotongan di satu titik dimana titik tersebut merupakan acuan untuk dapat menentukan teori gelombang yang akan dipakai. Grafik *Regions of Validity of Wave Theories* dapat dilihat pada gambar seperti yang tertera di bawah ini :



Gambar 2.8 Grafik *Region of Validity of Wave Theories* (Mouselli, 1981)

Kebanyakan dari perhitungan teori gelombang yang ada di Indonesia adalah menggunakan teori gelombang *stoke* orde dua. Teori gelombang *stoke* merupakan solusi untuk perairan yang membutuhkan tingkat akurasi lebih tinggi dari teori gelombang linier. *Stoke* memasukkan ekspresi deret kecepatan potensial dalam persamaan *Laplace* dan syarat batas dasar laut (Febrian, 2012). Persamaan kecepatan horizontal partikel air yang digunakan pada teori *stoke* orde dua dapat diketahui dari persamaan berikut :

$$U = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \cdot \cos \theta + \frac{3}{4} \left( \frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh 2ks}{\sinh^4 kd} \cdot \cos 2\theta \quad (2.7)$$

dengan :  $U$  = kecepatan horizontal partikel air, (m/s<sup>2</sup>)

$$k = \text{angka gelombang} = 2\pi/L \quad (2.8)$$

$L$  = panjang gelombang, (m)

$s$  = jarak vertikal titik yang ditinjau dari dasar laut, (m)

$$\theta = \text{sudut fase} = kx - \omega t \quad (2.9)$$

dengan :

$x$  = jarak horizontal titik yang ditinjau, (m)

$$\omega = \text{frekuensi gelombang, (rad/s)} = 2\pi / T \quad (2.10)$$

$t$  = waktu yang ditempuh untuk mencapai jarak horizontal titik yang ditinjau, (s)

Persamaan kecepatan horizontal partikel air jika diturunkan akan menjadi percepatan horizontal partikel air ( $\frac{\partial u}{\partial t}$ ) dimana persamaannya dapat dilihat pada rumus berikut ini :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{2\pi^2 H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \cdot \sin \theta + \frac{3\pi^2 H}{T^2} \left( \frac{\pi H}{L} \right) \frac{\cosh 2ks}{\sinh^4 kd} \cdot \sin 2\theta \quad (2.11)$$

Kecepatan partikel efektif dari partikel air pada kedalaman tertentu dapat dihitung menggunakan persamaan *Mouselli* (1981) seperti berikut :

$$U_{eff}^2 = 0,778 \cdot U_o^2 \cdot \left(\frac{D}{y_o}\right)^{0.286} \quad (2.12)$$

dengan:

$U_{eff}$  = kecepatan efektif partikel air pada ketinggian  $y_o$ , (m/s)

$U_o$  = kecepatan horizontal partikel air yang diketahui pada  $y_o$ , (m/s)

$$= \frac{U}{\left(\frac{y}{y_o}\right)^{1/7}} \quad (2.13)$$

$y$  = kedalaman titik yang ditinjau dari permukaan laut, (m)

$y_o$  = ketinggian orbit partikel dari dasar laut, (m)

Untuk mengetahui kecepatan partikel gelombang efektif ( $U_w$ ), dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.12). Begitupun untuk menghitung kecepatan partikel arus efektif ( $U_c$ ). Namun sebelum menghitung  $U_c$ , terlebih dahulu mencari kecepatan partikel arus ( $U_D$ ) dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$U_D = U_r \cdot \frac{\left(1 + \frac{Z_o}{D}\right) \cdot \left(\ln\left(\frac{D}{Z_o} + 1\right) - 1\right)}{\ln\left(\frac{Z_r}{Z_o} + 1\right)} \cdot \sin(\theta_{curr}) \quad (2.14)$$

dengan :

$U_r$  = kecepatan arus stabil, (m/s)

$Z_o$  = faktor kekasaran *seabed*, (m)

$Z_r$  = ketinggian arus di atas *seabed*, (m)

Setelah mendapatkan nilai dari kecepatan partikel gelombang efektif dan kecepatan partikel arus efektif, maka untuk menghitung kecepatan arus dan gelombang efektif total ( $U_e$ ) adalah dengan me-resultan kedua kecepatan tersebut dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$U_e = U_w + U_c = \sqrt{U_w^2 + U_c^2 + 2 \cdot U_w \cdot U_c \cdot \cos \theta} \quad (2.15)$$

Sedangkan untuk nilai koefisien *drag* ( $C_D$ ) dan koefisien inersia ( $C_M$ ) untuk perhitungan beban hidrodinamik didapat dengan terlebih dahulu mencari nilai *Reynolds Number*. Adapun rumus dari *Reynolds Number* ( $R_e$ ) adalah sebagai berikut :

$$R_e = \frac{U_e \cdot D}{\nu} \quad (2.16)$$

dengan :  $\nu$  = viskositas kinematis air, ( $m^2/s$ )

*Reynolds number* digunakan untuk menemukan koefisien hidrodinamik yang digunakan dalam perhitungan gaya-gaya hidrodinamika yang bekerja pada pipa bawah laut. Penentuan koefisien hidrodinamik dapat di lihat dalam tabel berikut :

Tabel 2.2 *Recommended Hydrodynamics Coefficient* (Mouselli, 1981)

| <b><i>Reynolds number</i> (<math>R_e</math>)</b> | <b><i>Hydrodynamic Coefficient</i></b> |                                   |                                   |
|--|--|-----------------------------------|-----------------------------------|
|  | <b><math>C_D</math></b>                | <b><math>C_L</math></b>           | <b><math>C_M</math></b>           |
| $R_e < 5.0 \times 10^4$                          | 1.3                                    | 1.5                               | 2.0                               |
| $5.0 \times 10^4 < R_e < 1.0 \times 10^5$        | 1.6                                    | 1.0                               | 2.0                               |
| $1.0 \times 10^5 < R_e < 2.5 \times 10^5$        | $1.53 - \frac{R_e}{3 \times 10^5}$     | $1.2 - \frac{R_e}{5 \times 10^5}$ | 2.0                               |
| $2.5 \times 10^5 < R_e < 5.0 \times 10^5$        | 0.7                                    | 0.7                               | $2.5 - \frac{R_e}{5 \times 10^5}$ |
| $R_e > 5.0 \times 10^5$                          | 0.7                                    | 0.7                               | 1.5                               |

Sedangkan untuk mencari nilai beban pipa terendam ( $W_{sub}$ ), maka menggunakan rumus sebagai berikut :

$$W_{sub} = W_{st} + W_{corr} + W_{cc} + W_{cont} - W_{buoy} \quad (2.17)$$

dengan :  $W_{st}$  = berat pipa baja, (N/m)

$$= \frac{\pi}{4} \cdot \rho_s \cdot (OD^2 - ID^2) \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned}
W_{corr} &= \text{berat lapisan anti korosi, (N/m)} \\
&= \frac{\pi}{4} \cdot \rho_{corr} \cdot [(OD^2 + 2 \cdot t_{corr})^2 - OD^2] \quad (2.19)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
W_{cc} &= \text{berat selimut beton, (N/m)} \\
&= \frac{\pi}{4} \cdot \rho_{cc} \cdot [(OD^2 + 2 \cdot t_{corr} + 2 \cdot t_{cc})^2 - (OD^2 + 2 \cdot t_{corr})^2] \quad (2.20)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
W_{cont} &= \text{berat isi pipa, (N/m)} \\
&= \frac{\pi}{4} \cdot \rho_{cont} \cdot ID^2 \quad (2.21)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
W_{buoy} &= \text{berat gaya apung, (N/m)} \\
&= \frac{\pi}{4} \cdot \rho \cdot (OD^2 + 2 \cdot t_{corr} + 2 \cdot t_{cc})^2 \quad (2.22)
\end{aligned}$$

dengan :

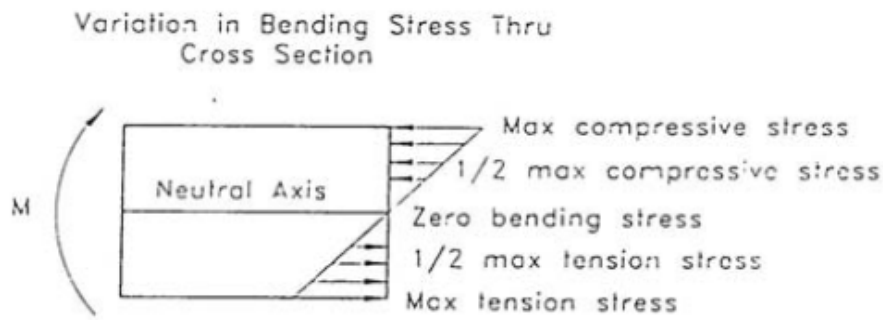
$$\begin{aligned}
\rho_s &= \text{densitas baja, (N/m}^3\text{)} \\
OD &= \text{outside diameter, (m)} \\
ID &= \text{inside diameter, (m)} \\
\rho_{corr} &= \text{densitas lapisan anti korosi, (N/m}^3\text{)} \\
t_{corr} &= \text{tebal lapisan anti korosi, (m)} \\
\rho_{cc} &= \text{densitas selimut beton, (N/m}^3\text{)} \\
t_{cc} &= \text{tebal selimut beton, (m)} \\
\rho_{cont} &= \text{densitas fluida dalam pipa, (N/m}^3\text{)}
\end{aligned}$$

### 2.3.1.3 Tegangan Longitudinal Akibat Momen Lentur

Tegangan terbesar terletak pada bagian dengan jarak yang terjauh dari pusat (*neutral axis*), sedangkan tegangan pada *neutral axis* adalah nol. Tegangan longitudinal pada pipa akibat momen lentur ( $\sigma_b$ ) dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut :

$$\sigma_b = \frac{M \cdot D}{2 \cdot I} \quad (2.23)$$

dengan :  $I$  = momen inersia, (m<sup>4</sup>)



Gambar 2.9 Tegangan longitudinal pada dinding pipa akibat momen  
*bending* (Nugroho, 2009)

#### 2.3.1.4 Tegangan Longitudinal Akibat Beda Tekanan

Tegangan longitudinal akibat beda tekanan ( $\sigma_i$ ), dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\sigma_i = \frac{S_{eff} + P_i \cdot A_i - P_e \cdot A_e}{A_s} \quad (2.24)$$

dengan :

$S_{eff}$  = gaya aksial efektif, (N)

$A_i$  = luas permukaan dalam penampang melintang pipa, (m<sup>2</sup>)

$A_e$  = luas permukaan luar penampang melintang pipa, (m<sup>2</sup>)

$A_s$  = luas penampang pipa, (m<sup>2</sup>)

$P_i$  = tekanan internal, (Pa)

$P_e$  = tekanan eksternal, (Pa)

#### 2.3.1.5 Batas Tegangan Longitudinal Kombinasi

Penjumlahan antara tegangan longitudinal akibat momen lentur dan tegangan longitudinal akibat beda tekanan memiliki batas dimana :

$$\sigma_b + \sigma_i \leq 0,8 \text{ SMYS} \quad (2.25)$$

dengan :  $\text{SMYS}$  = *Specified Minimum Yield Stress* material, (Pa)

### 2.3.1.6 Panjang *Free Span* Statik

Panjang *span* statik ( $L_p$ ) merupakan panjang efektif dari sebuah pipa yang dalam kondisi *free span* dihitung secara statis, ditunjukkan dalam persamaan sebagai berikut :

$$L_p = \sqrt{\frac{8M}{W}} \quad (2.26)$$

### 2.3.2 Analisis Tegangan-Tegangan pada Pipa Bawah Laut

Analisis *free span* pipa bawah laut yang dilakukan mengacu pada *standard code* DNV RP F105 2006 : *Free Spanning Pipelines*. *Standard code* ini mensyaratkan desain *free span* pipa terhadap kondisi *Ultimate Limit State (ULS)* dan kondisi *Fatigue Limit State (FLS)*. *ULS* merupakan syarat kekuatan pipa untuk menahan gaya-gaya yang bekerja terhadap *buckling* atau analisis mekanika teknik secara statis. Sedangkan *FLS* merupakan syarat kekuatan pipa terhadap *Vortex Induced Vibration (VIV)* yang dapat menyebabkan kegagalan pada pipa.

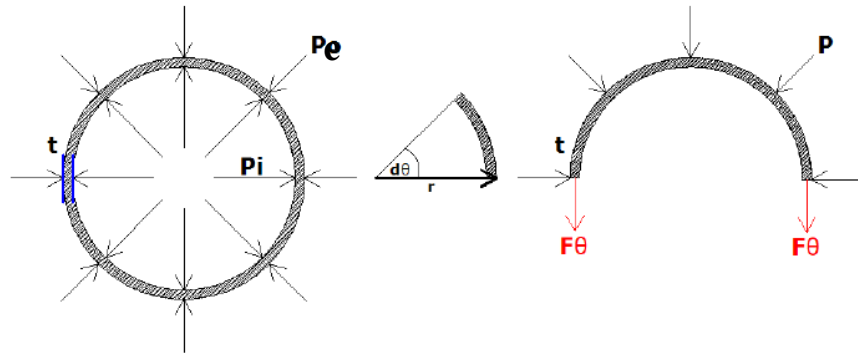
Pada kasus *free span*, terdapat gaya-gaya yang bekerja pada pipa yaitu gaya dari dalam pipa (gaya internal) serta gaya lingkungan dari luar pipa (gaya eksternal). Gaya-gaya internal contohnya adalah tekanan internal dan tegangan longitudinal. Gaya internal ini pada umumnya disebabkan oleh kondisi instalasi dan operasi pipa bawah laut. Sedangkan contoh dari gaya eksternal adalah tekanan hidrostatik. Besarnya gaya atau tegangan dan dampak yang terjadi pada pipa bergantung pada tipe material pipa yang digunakan (Pratama, 2007).

#### 2.3.2.1 *Hoop Stress*

*Hoop stress* atau yang biasa dikenal dengan tegangan tangensial ini merupakan tegangan yang diakibatkan adanya tekanan fluida yang diberikan pada suatu silinder sehingga muncul reaksi dari material penyusun silinder pipa. Tegangan ini secara statis dapat ditentukan besarnya, sehingga besar nilai tegangan yang terjadi tidak melampaui tegangan plastis dari struktur pipa yang dapat menyebabkan kegagalan



pada struktur pipa bawah laut. Dalam kasus pipa bawah laut, maka tekanan fluida yang dimaksud adalah tekanan baik yang diberikan dari dalam pipa maupun dari luar pipa. Tekanan dari dalam pipa disebabkan oleh tekanan fluida dalam pipa itu sendiri, sedangkan tekanan dari luar pipa disebabkan adanya tekanan hidrostatik dikarenakan kedalaman pipa tersebut.



Gambar 2.10 Ilustrasi tekanan internal ( $P_i$ ) dan tekanan eksternal ( $P_e$ ) pada pipa bawah laut (Pratama, 2007)

Untuk menentukan tegangan tangensial ( $\sigma_H$ ) yang terjadi adalah dengan membagi nilai gaya tangensial ( $F_\theta$ ) dengan ketebalan dinding ( $WT$ ) seperti pada persamaan berikut :

$$\sigma_H = \frac{F_\theta}{WT} \text{ atau } \sigma_H = \frac{P \cdot D}{2 \cdot WT} \quad (2.27)$$

dengan :  $P$  = resultan tekanan yang mengelilingi pipa, (Pa)

Sedangkan untuk silinder berdinding tebal, maka besar *hoop stress* adalah sebagai berikut :

$$\sigma_H = \frac{P \cdot r}{WT} = \frac{|P_e - P_i| \cdot (OD - WT)}{2 \cdot WT} \quad (2.28)$$

dimana  $r$  adalah selisih antara diameter terluar (*outside diameter*) dengan ketebalan dinding (*wall thickness*).

### 2.3.2.2 End Cap Effect Stress

Tegangan *end cap effect* ( $\sigma_{ep}$ ) merupakan tegangan yang disebabkan oleh tegangan fluida di dalam pipa pada ujung pipa yang tertutup dan berpengaruh terhadap *bending* yang terjadi pada pipa. Persamaan tegangan ini dinyatakan sebagai berikut :

$$\sigma_{ep} = \frac{\sigma_H}{2} \quad (2.29)$$

### 2.3.2.3 Bending Stress

Tegangan ini terjadi akibat adanya momen tekuk yang dialami pada pipa yang disebabkan oleh beban, sehingga beban total ( $q$ ) penghasil gaya tekuk tersebut perlu diketahui. Beban total yang dimaksud merupakan beban kombinasi dari berat pipa dalam air dan gaya hidrodinamik horizontal yang dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$q = \sqrt{W_{sub}^2 + (F_D + F_I)^2} \quad (2.30)$$

Maka *maximum bending stress* ( $\sigma_B$ ) yang terjadi dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$\sigma_B = \frac{M_B \cdot D_{tcc}}{2 \cdot I} \quad (2.31)$$

dimana persamaan momen tekuk statik maksimum ( $M_B$ ) dinyatakan dengan rumus :

$$M_B = \frac{q \cdot L_p^2}{C} \quad (2.32)$$

dengan :  $D_{tcc}$  = tebal dinding (*coating+concrete*), (m)

$C$  = konstanta kondisi batas perletakan, dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 2.3 Konstanta Perletakan Ujung Bentang Bebas pada Analisis Statik  
(Abizar, 2008)

| Jenis Perletakan Ujung Bentang | C    |
|--------------------------------|------|
| <i>Pinned to pinned</i>        | 8.0  |
| <i>Fixed to pinned</i>         | 10.0 |
| <i>Fixed to fixed</i>          | 12.0 |

#### 2.3.2.4 Thermal Stress

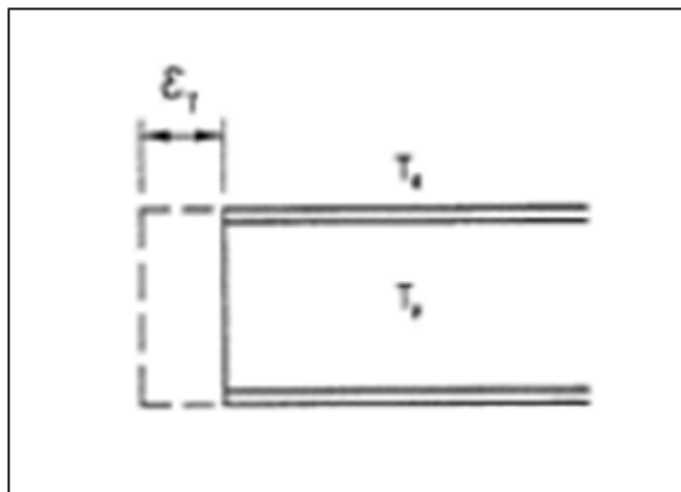
*Thermal stress* ( $\sigma_T$ ) adalah tegangan yang terjadi akibat adanya pemuaian pada pipa bawah laut. Dalam hal ini sangat penting untuk mengetahui karakteristik material pipa dikarenakan tegangan ini jika berlebihan dapat menyebabkan terjadinya retakan akibat material yang tidak mampu menahan *thermal stress* tersebut. Persamaan tegangan pemuaian ini adalah sebagai berikut :

$$\sigma_T = E \cdot \alpha_T \cdot \Delta T \quad (2.33)$$

dengan :  $E$  = modulus elastisitas baja, (Pa)

$\Delta T$  = perbedaan temperatur antara kondisi instalasi dan operasional, (C°)

$\alpha_T$  = koefisien *thermal expansion*



Gambar 2.11 Ilustrasi *thermal stress* (Abizar, 2008)

### 2.3.2.5 Poisson Stress

*Poisson stress* merupakan tegangan yang muncul akibat adanya tegangan residual pada saat fabrikasi pipa sehingga menyebabkan pipa harus kembali ke keadaan semula dan hal tersebut mengakibatkan kontraksi pada dinding pipa. Persamaan *poisson stress* ( $\sigma_P$ ) adalah sebagai berikut :

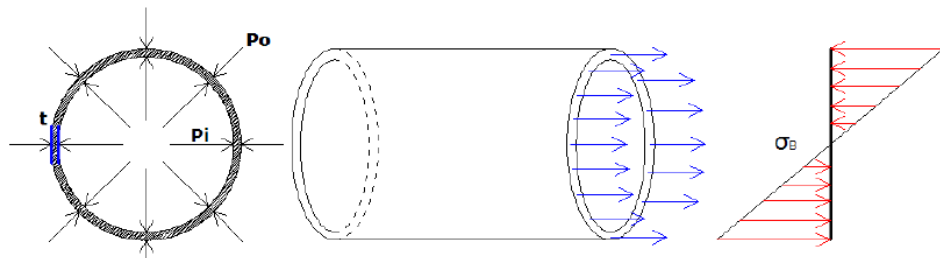
$$\sigma_P = \nu \cdot \sigma_H \quad (2.34)$$

dengan :  $\nu$  = *poisson ratio*

### 2.3.2.6 Longitudinal Stress

*Longitudinal stress* merupakan kombinasi dari *bending stress*, *thermal stress*, *end cap effect stress*, dan *poisson stress*. Tegangan ini merupakan tegangan aksial yang bekerja pada penampang pipa. Persamaan *longitudinal stress* ( $\sigma_L$ ) adalah sebagai berikut :

$$\sigma_L = \sigma_B + \sigma_{ep} + \sigma_T + \sigma_P \quad (2.35)$$



Gambar 2.12 Ilustrasi tegangan longitudinal pada pipa (Pratama, 2007)

### 2.3.2.7 Equivalent Stress

*Equivalent stress* merupakan resultan seluruh komponen tegangan yang terjadi pada pipa. Persamaan tegangan ekuivalen ( $\sigma_E$ ) yang dirumuskan juga sebagai tegangan *von mises* ini adalah seperti berikut :

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_H^2 + \sigma_L^2 - \sigma_H \cdot \sigma_L + 3 \cdot \tau_x^2} \quad (2.36)$$

Besaran tegangan geser tangensial ( $\tau_x$ ) diabaikan dalam perhitungan tegangan ekuivalen ini karena besarnya tidak dominan dibanding komponen tegangan lainnya.

#### 2.3.2.8 Kriteria *Allowable Stress Design* (ASD)

Tegangan-tegangan yang terjadi pada pipa bawah laut tidak boleh melebihi batas yang diizinkan sesuai dengan kriteria pada DNV OS F101 : *Submarine Pipeline System* 2012. Pipa bawah laut bisa dikatakan aman apabila tegangan-tegangannya memenuhi kriteria sebagai berikut :

a) *Hoop stress* :

$$\sigma_H \leq \eta \cdot (SMYS - f_{y,temp}) \quad (2.37)$$

b) *Longitudinal stress* :

$$\sigma_L \leq \eta \cdot f_y \quad (2.38)$$

c) *Equivalent stress / Von mises stress* :

$$\sigma_E \leq \eta \cdot f_y \quad (2.39)$$

dengan :

$\eta$  = usage factor (DNV OS F101 2012, Table 5-16)

$f_{y,temp}$  = derating strength value due to temperature, (Pa)

$f_y$  = characteristic yield stress, (Pa)

### 2.3.3 Analisis Kriteria *Global Buckling* pada Pipa Bawah Laut

#### 2.3.3.1 *System Collapse*

Semakin dalam suatu perairan, maka tekanan yang terjadi juga akan semakin besar. Hal ini yang harus dipertimbangkan oleh para perancang pipa bawah laut agar nanti ketika pipa beroperasi pada kedalaman tertentu, tekanan eksternal yang melebihi tekanan internal pipa tidak dapat mengakibatkan *collapse*. *Collapse* pada dinding pipa bergantung pada berbagai faktor, termasuk rasio antara diameter terhadap ketebalan pipa ( $D/t$ ), karakteristik tegangan dan regangan material, beserta ovalisasi. Berdasarkan standar DNV OS F101 2012 : *Submarine Pipeline System*,

karakteristik tahanan untuk tekanan *collapse* ( $P_c$ ) ditentukan dengan persamaan berikut :

$$(P_c - P_{el}) \cdot (P_c^2 - P_p^2) = P_c \cdot P_{el} \cdot P_p \cdot f_o \cdot (D/WT) \quad (2.40)$$

dengan :

$$P_{el} = \frac{2 \cdot E \cdot (WT/D)^3}{1 - \nu^2} \quad (2.41)$$

$$P_p = 2 \cdot f_y \cdot \alpha_{fab} \cdot (WT/D) \quad (2.42)$$

$$f_o = \frac{D_{max} - D_{min}}{D} \quad (2.43)$$

dengan :

$P_c$  = karakteristik tekanan *collapse*, (Pa)

$P_{el}$  = tekanan *collapse* elastis, (Pa)

$P_p$  = tekanan *collapse* plastis, (Pa)

$f_o$  = ovalisasi

$\alpha_{fab}$  = faktor fabrikasi (DNV OS F101 2012; *Table 5-5*)

$D_{max}$  = diameter pipa terbesar yang diukur, (m)

$D_{min}$  = diameter pipa terkecil yang diukur, (m)

Sesuai dengan standar DNV OS F101 2012 : *Submarine Pipeline System*, tekanan eksternal yang terjadi di sepanjang pipa harus memenuhi kriteria dibawah ini (pengecekan terhadap *system collapse*) :

$$P_e - P_{min} \leq \frac{P_c}{\gamma_m \cdot \gamma_{SC}} \quad (2.44)$$

dengan :

$P_{min}$  = tekanan internal minimum, untuk kasus pipa bawah laut nilainya nol, (Pa)

$\gamma_m$  = *material resistance factor* (DNV OS F101, 2012; *Table 5-2*)

$\gamma_{SC}$  = *safety class resistance factor* (DNV OS F101, 2012; *Table 5-3*)

### 2.3.3.2 Pressure Containment

Kriteria ini merupakan syarat kekuatan pipa untuk mampu menahan tekanan internal yang terjadi akibat fluida yang bergerak di dalam pipa. Pengecekan kekuatan pipa terhadap *pressure containment* dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$P_{li} - P_e \leq \frac{P_b(t)}{\gamma_{SC} \cdot \gamma_m} \quad (2.45)$$

dengan :

$$\begin{aligned} P_{li} &= \text{tekanan lokal insidental, (Pa)} \\ &= P_d \cdot \gamma_{inc} + \rho_{cont} \cdot g \cdot h \end{aligned} \quad (2.46)$$

$$P_d = \text{pressure design, (Pa)}$$

$$\gamma_{inc} = \text{incidental to design pressure ratios}$$

$$\rho_{cont} = \text{contents density, (N/m}^3\text{)}$$

$$h = \text{jarak antara titik referensi dengan permukaan air laut, (m)}$$

$$P_b(t) = \text{pressure containment, (Pa)}$$

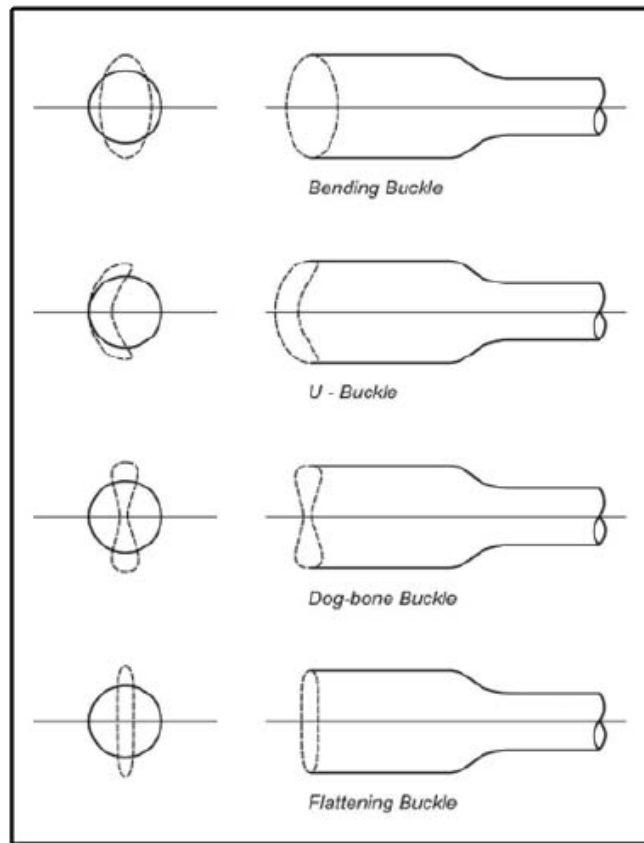
$$= \frac{2 \cdot t}{D-t} \cdot f_{cb} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (2.47)$$

$$f_{cb} = \text{Minimum} \left[ f_y; \frac{f_u}{1,15} \right]$$

$$f_u = \text{characteristic ultimate strength, (Pa)}$$

### 2.3.3.3 Propagation Buckling

*Propagating buckling* adalah deformasi bentuk pada penampang melintang pipa yang kemudian berubah menjadi *buckle* yang memanjang dan merambat di sepanjang pipa. Penyebab utama dari *propagation buckling* ini adalah tekanan eksternal (hidrostatik) yang nilainya lebih besar dari tekanan yang diperlukan untuk mencegah terjadinya perambatan *buckle* tersebut. Terjadinya *propagation buckling* di dahului oleh adanya *local buckling* dan tidak bisa menjalar ke bagian lain jika tekanan eksternal masih di bawah tekanan propagasi ( $P_{pr}$ ).



Gambar 2.13 Jenis-jenis umum *propagation buckling* (Abizar, 2008)

Berdasarkan DNV OS F101 : *Submarine Pipeline Systems* 2012, nilai tekanan *propagation buckling* dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan di bawah ini :

$$P_{pr} = 35 \cdot f_y \cdot \alpha_{fab} \cdot (WT/D)^{2.5} \quad (2.48)$$

dengan :

$$P_{pr} = \text{propagation buckling, (Pa)}$$

Kriteria pengecekan terhadap *propagation buckling* dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$P_e - P_{min} \leq \frac{P_{pr}}{\gamma_m \cdot \gamma_{SC}} \quad (2.49)$$



### 2.3.3.4 Combined Loading Criteria

Kriteria ini menunjukkan syarat kekuatan dari pipa bawah laut terhadap semua gaya dan tekanan yang terjadi pada pipa. Gaya dan tekanan yang dimaksud yaitu kombinasi pembebanan terhadap *design bending moment*, *design effective axial force*, tekanan internal dan eksternal, tekanan pada *pressure containment*, tekanan *collapse*, dan karakteristik tahanan gaya aksial plastis. Berdasarkan standar DNV OS F101 : *Submarine Pipeline System* 2012, kriteria ini akan diperiksa terhadap dua kondisi, yaitu:

#### 2.3.3.4.1 Tekanan Internal Berlebih (*Internal Overpressure*)

Pada kondisi ini kekuatan pipa akan diperiksa terhadap tekanan internal yang terjadi. Tekanan ini dipengaruhi oleh tekanan fluida pengisi (*pressure containment*) serta tahanan aksial dari pipa. Berdasarkan pada standar DNV OS F101 : *Submarine Pipeline System* 2012, kriteria ini harus memenuhi persamaan berikut :

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot S_{sd}(p_i)}{\alpha_c \cdot S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left( \alpha_p \cdot \frac{p_i - p_e}{\alpha_c \cdot p_b(t_2)} \right)^2 \leq 1 \quad (2.50)$$

dengan :

$M_{sd}$  = *design bending moment*, (Nm)

$\alpha_c$  = *flow stress parameter*

$$= (1 - \beta) + \beta \cdot \frac{f_u}{f_y} \quad (2.51)$$

$\beta$  = *combined loading criteria factor*

$$= \frac{60 - D/WT}{90} \quad (2.52)$$

$M_p(t_2)$  = tahanan momen plastis, (Nm)

$$= f_y \cdot (D - WT)^2 \cdot WT \quad (2.53)$$

$S_{sd}(p_i)$  = gaya aksial afektif desain, (N)

$S_p(t_2)$  = karakteristik tahanan gaya aksial plastis, (N)

$$= f_y \cdot \pi \cdot (D - WT) \cdot WT \quad (2.54)$$

$\alpha_p$  = faktor tekanan untuk *combined loading criteria*

$$= 1 - \beta, \quad \frac{P_i - P_e}{P_b} < 2/3 \quad (2.55)$$

$$= 1 - 3\beta \left( 1 - \frac{P_i - P_e}{P_b} \right), \quad \frac{P_i - P_e}{P_b} \geq 2/3 \quad (2.56)$$

#### 2.3.3.4.2 Tekanan Eksternal Berlebih (*External Overpressure*)

Pada kondisi ini kekuatan pipa akan diperiksa berdasarkan tekanan eksternal yang terjadi. Tekanan ini sangat dipengaruhi oleh tekanan eksternal terhadap pipa. Tahanan dari kondisi tersebut di antaranya adalah tekanan *collapse*. Kriteria ini dinyatakan dalam persamaan dibawah ini :

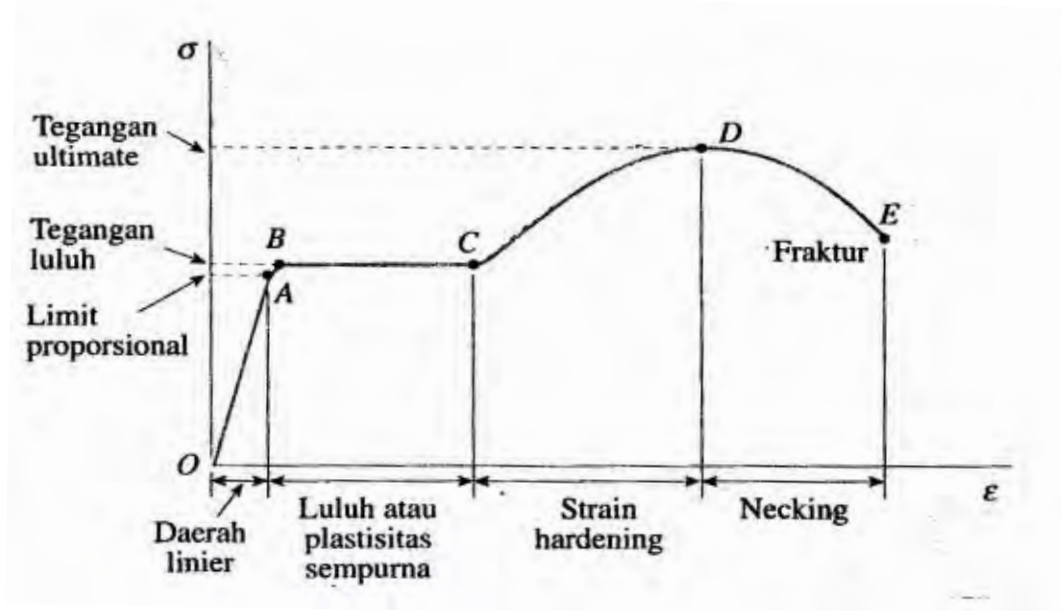
$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{|M_{Sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t_2)} + \left[ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot S_{Sd}}{\alpha_c \cdot S_p(t_2)} \right]^2 \right\}^2 + \left( \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{P_e - P_{min}}{p_c(t_2)} \right)^2 \leq 1 \quad (2.57)$$

#### 2.3.4 Analisis Batas Tegangan *Ultimate*

Jalur pipa bawah laut milik PGN yang dianalisa pada tugas akhir ini terletak di Laut Jawa, dimana di sekitar daerah tersebut pernah terjadi gempa pada tanggal 9 Agustus 2007 yang berpusat di 75 kilometer Barat Laut Indramayu dengan kedalaman mencapai 200 km dari bawah laut (Antara News, 2007). Gempa bumi yang terjadi di bawah laut merupakan salah satu faktor yang mampu menimbulkan resiko terjadinya tsunami.

Tsunami adalah gelombang yang terjadi karena gempa bumi atau letusan gunung api di laut dimana gelombang yang terjadi bervariasi dari 0,5 m sampai 30 m dan periode dari beberapa menit sampai sekitar satu jam (Triatmodjo, 1999). Salah satu dampak dari terjadinya tsunami adalah meningkatnya cepat rambat gelombang dan juga kecepatan arus laut. Resiko tersebut perlu dianalisa dikarenakan akan berdampak pada kekuatan struktur pipa bawah laut khususnya pada kondisi batas *ultimate* struktur tersebut.

Bila suatu batang yang terbuat dari baja lunak ditarik oleh gaya aksial tertentu pada kondisi temperatur ruang, maka respon struktur baja tersebut dapat digambarkan pada suatu diagram yang menyatakan hubungan tegangan regangan yang terjadi dimana diagram tersebut dapat dilihat pada gambar di bawah ini :



Gambar 2.14 Kurva tegangan-regangan baja struktural (Mulyati, 2013)

Daerah OA merupakan garis lurus yang merupakan daerah linier elastis. Kemiringan garis tersebut menyatakan besarnya modulus elastisitas atau yang biasa juga dikenal dengan *Modulus Young*. Titik A merupakan titik luluh bawah (*lower yield point*), sedangkan titik B merupakan titik luluh atas (*upper yield point*). Daerah BC merupakan daerah platis dimana regangan bertambah tetapi tegangan tetap. Sedangkan daerah CD merupakan daerah *strain hardening* dimana pada daerah ini pertambahan regangan akan diikuti dengan sedikit pertambahan tegangan. Pada titik D, tegangannya mencapai nilai maksimum atau dengan kata lain merupakan tegangan tarik *ultimate* (*Ultimate Tensile Strength*). Dan pada titik E, material akan putus.

Analisis batas tegangan *ultimate* merupakan analisis yang dilakukan untuk mengetahui batas tegangan maksimum suatu struktur untuk menahan beban. Sebelum melakukan analisis tersebut, perlu dilakukan terlebih dahulu perhitungan

gaya-gaya yang bekerja pada struktur pipa bawah laut. Dalam tugas akhir ini, gaya yang diperhitungkan adalah *drag force* hingga *equivalent/von mises stress*. Metode yang digunakan untuk melakukan analisis *ultimate* ini adalah dengan menggunakan metode *Incremental Load* dimana analisis dilakukan dengan meningkatkan kecepatan arus dan gelombang efektif secara bertahap sampai tegangan yang terjadi melebihi batas *ultimate*-nya.

Berdasarkan *code American Bureau of Shipping : Commentary on the Guide-Buckling and Ultimate Strength Assesment for Offshore Structures* tahun 2005, suatu struktur akan mengalami kegagalan pada saat tegangan yang terjadi pada struktur tersebut melebihi dari  $0,8 \times \text{Ultimate Tensile Strength (UTS)}$ .

## **2.4 Metode Elemen Hingga**

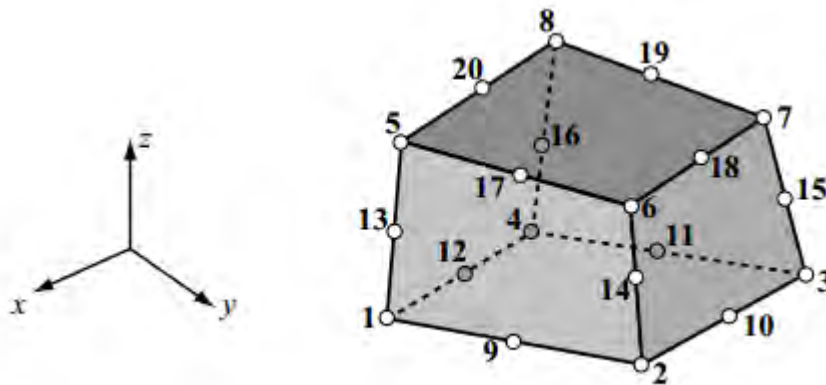
### **2.4.1 Dasar Metode Elemen Hingga**

Penyelesaian suatu permasalahan dalam bidang rekayasa umumnya menghasilkan ekspresi atau model matematik yang melibatkan kondisi batas (*boundary condition*), sifat material, ketidaklinieran material, dan geometri, sehingga jarang sekali model matematis untuk masalah-masalah teknik yang bisa diselesaikan secara analitis. Keadaan inilah yang memaksa *engineer* menggunakan analisis numerik yang kendatipun hasilnya hanya bersifat pendekatan tetapi dianggap cukup dapat diterima (Putri, 2011).

Pada prinsip dasarnya, metode elemen hingga merupakan metode yang memperlakukan suatu sistem atau dalam hal ini adalah struktur pipa bawah laut sebagai gabungan dari elemen-elemen kecil yang digabungkan satu sama lain oleh titik-titik yang disebut *joint/node*. Fungsi yang sederhana tersebut umumnya dipilih untuk mendekati distribusi atau variasi lendutan yang sesungguhnya pada tiap elemen. Fungsi yang seharusnya memenuhi syarat-syarat tertentu itu disebut dengan *displacement function*. Hasil yang diinginkan seperti besar lendutan dihitung pada tiap *node*, sehingga hasil akhir yang diperoleh adalah harga pendekatan dari lendutan pada lokasi-lokasi dari sistem yang dianalisa.

### 2.4.2 Konsep Elemen Hingga Nonlinier Ansys

Ansys adalah salah satu perangkat lunak yang menggunakan metode pemodelan dan analisis struktur yang lebih kompleks dan detail. *Software* ini menjadikan bentuk fisik model struktur sebagai suatu sistem linier yang berkesinambungan dengan cara membagi bentuk fisik tersebut menjadi kelompok elemen-elemen yang lebih kecil (*meshing*). Elemen-elemen ini dihubungkan dengan simpul-simpul (*nodes*) sehingga menjadi satu sistem yang kontinyu. Dalam tugas akhir ini, struktur pipa bawah laut akan dimodelkan pada Ansys 15.0 dengan menggunakan jenis *solid elements* dikarenakan struktur ini berbentuk 3D dan menggunakan perhitungan dari 3 sumbu ( $x, y, z$ ) sehingga pemodelan tersebut sudah cukup mendekati elemen sebenarnya.



Gambar 2.15 Contoh gambar *solid elements* dengan *nodes* (Cook, 1989)

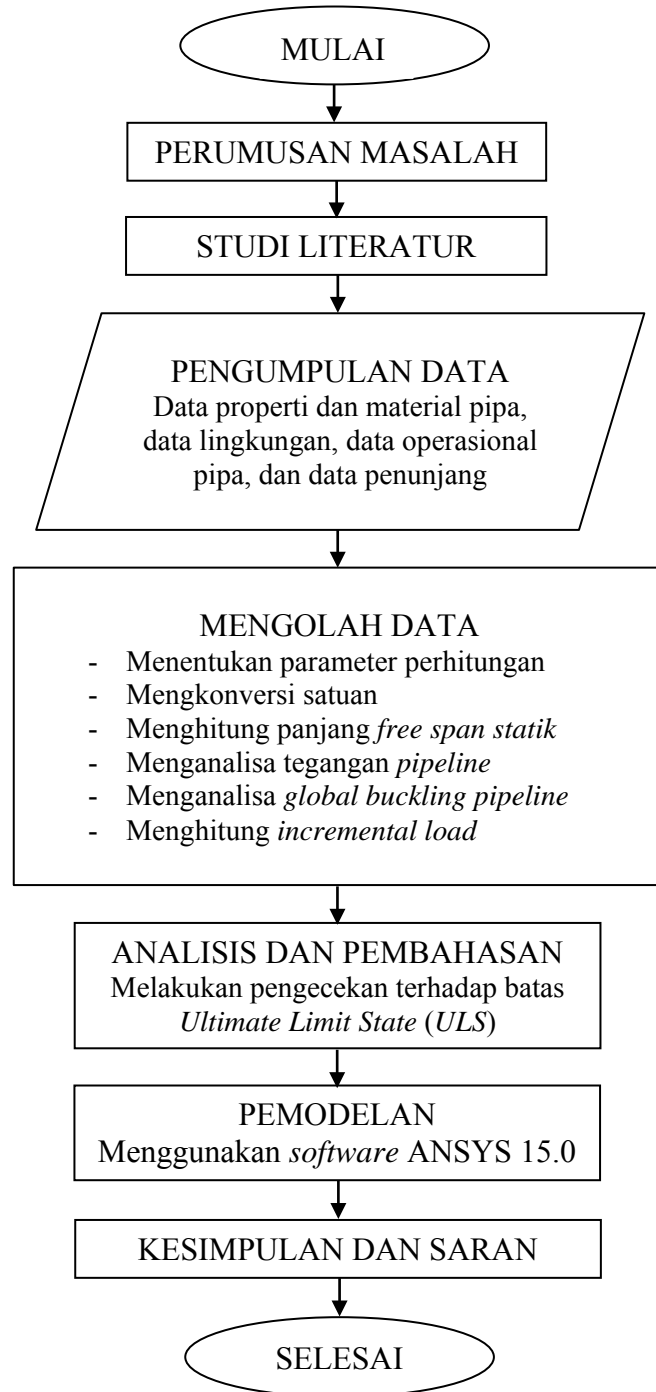
Beberapa penyebab perilaku nonlinier adalah seperti adanya sentuhan elemen, kenonlinieran material, dan kenonlinieran geometrik (perubahan dalam respons karena adanya deformasi yang besar). Untuk menyelesaikan permasalahan ini, beban akan ditambahkan secara bertahap dan berikut langkah-langkahnya :

- Memodelkan struktur pada Ansys 15.0 baik menentukan ukuran, properties, tipe elemen, dan menentukan ukuran *mesh*.
- Meshing* model yang sudah dibuat.
- Menentukan tipe analisis, memasukkan beban serta gaya-gaya yang mengenai struktur dan menentukan *boundary condition*.
- Menganalisa hasil yang keluar dari Ansys berupa bentuk deformasi dan tegangan maksimum yang terjadi akibat beban yang bekerja.

## BAB III

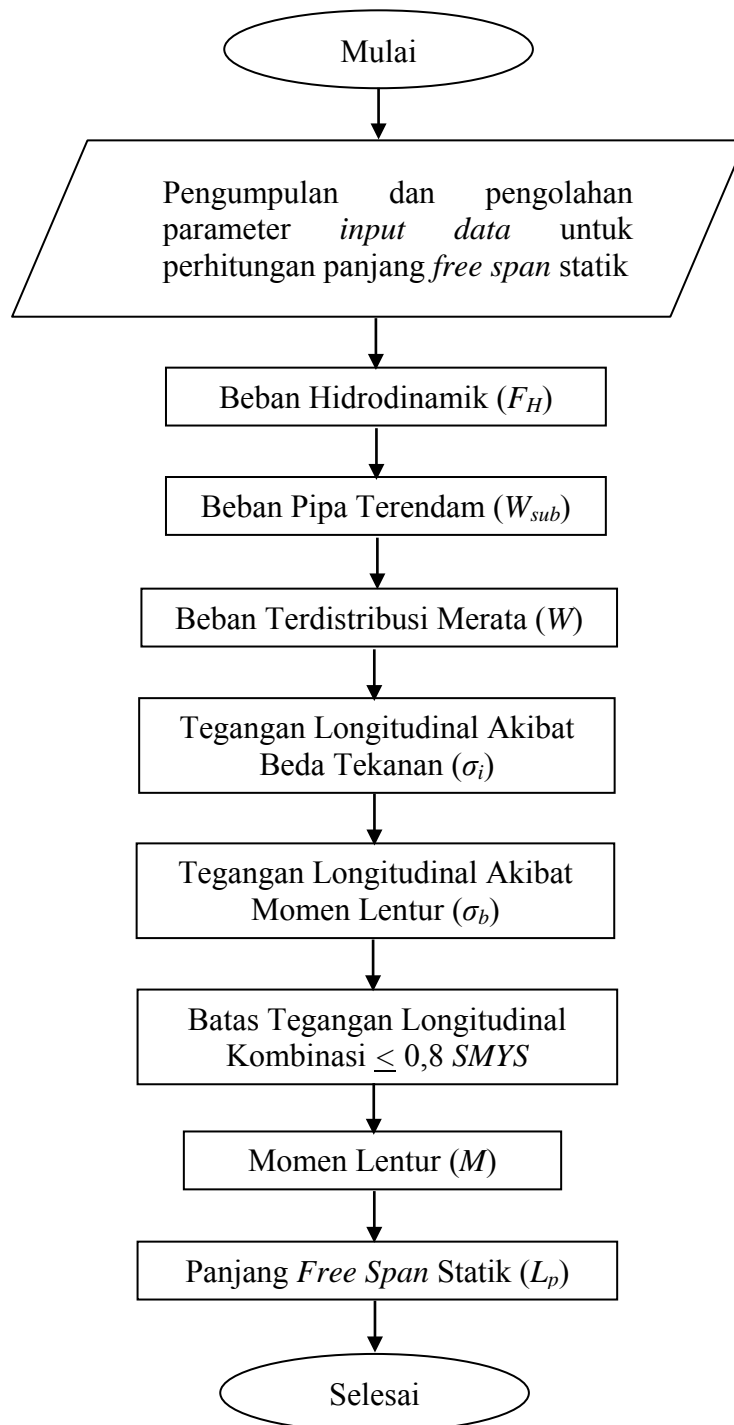
### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Metode Penelitian



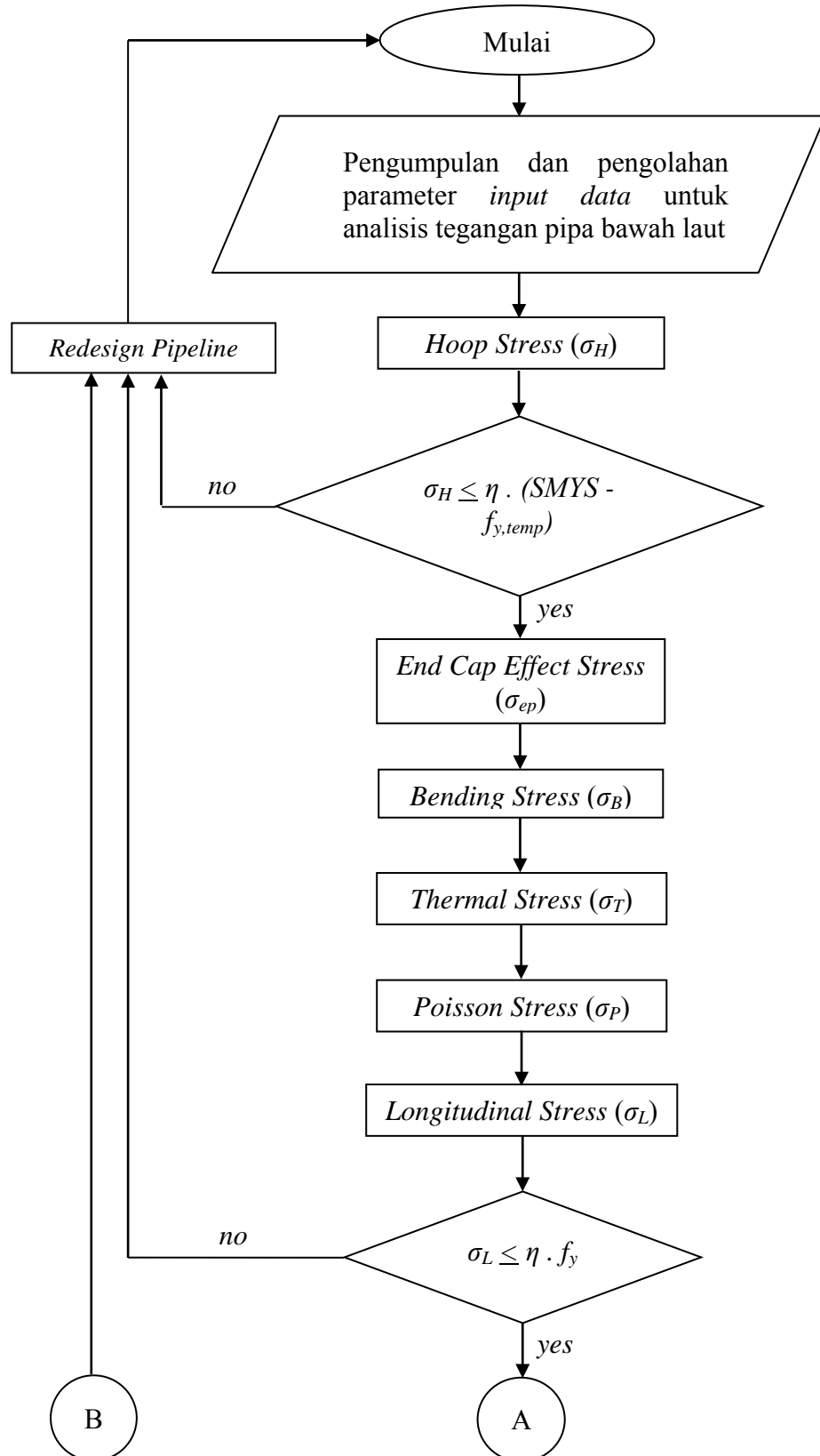
Gambar 3.1 Diagram alir pengerjaan tugas akhir

### 3.1.1 Metodologi Analisis *Free Span* Statik pada Pipa Bawah Laut

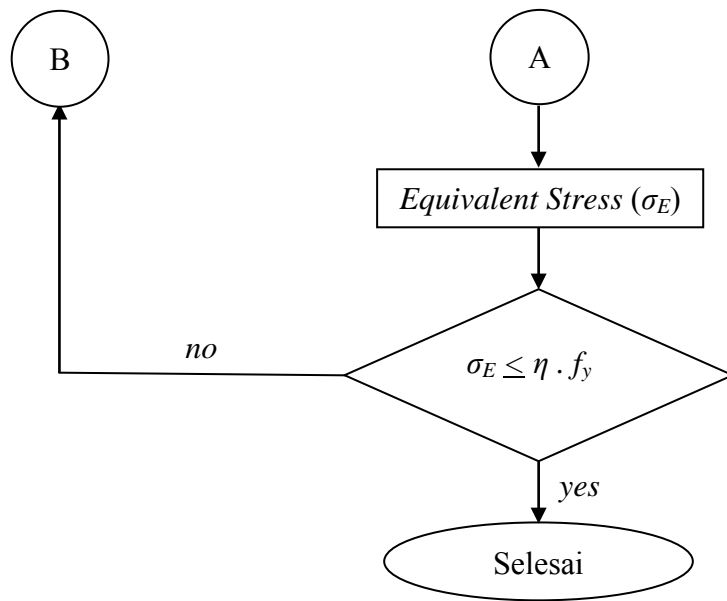


Gambar 3.2 Metodologi perhitungan panjang *free span* statik

### 3.1.2 Metodologi Analisis Tegangan-Tegangan dan Kriteria *Allowable Stress Design (ASD)* pada Pipa Bawah Laut

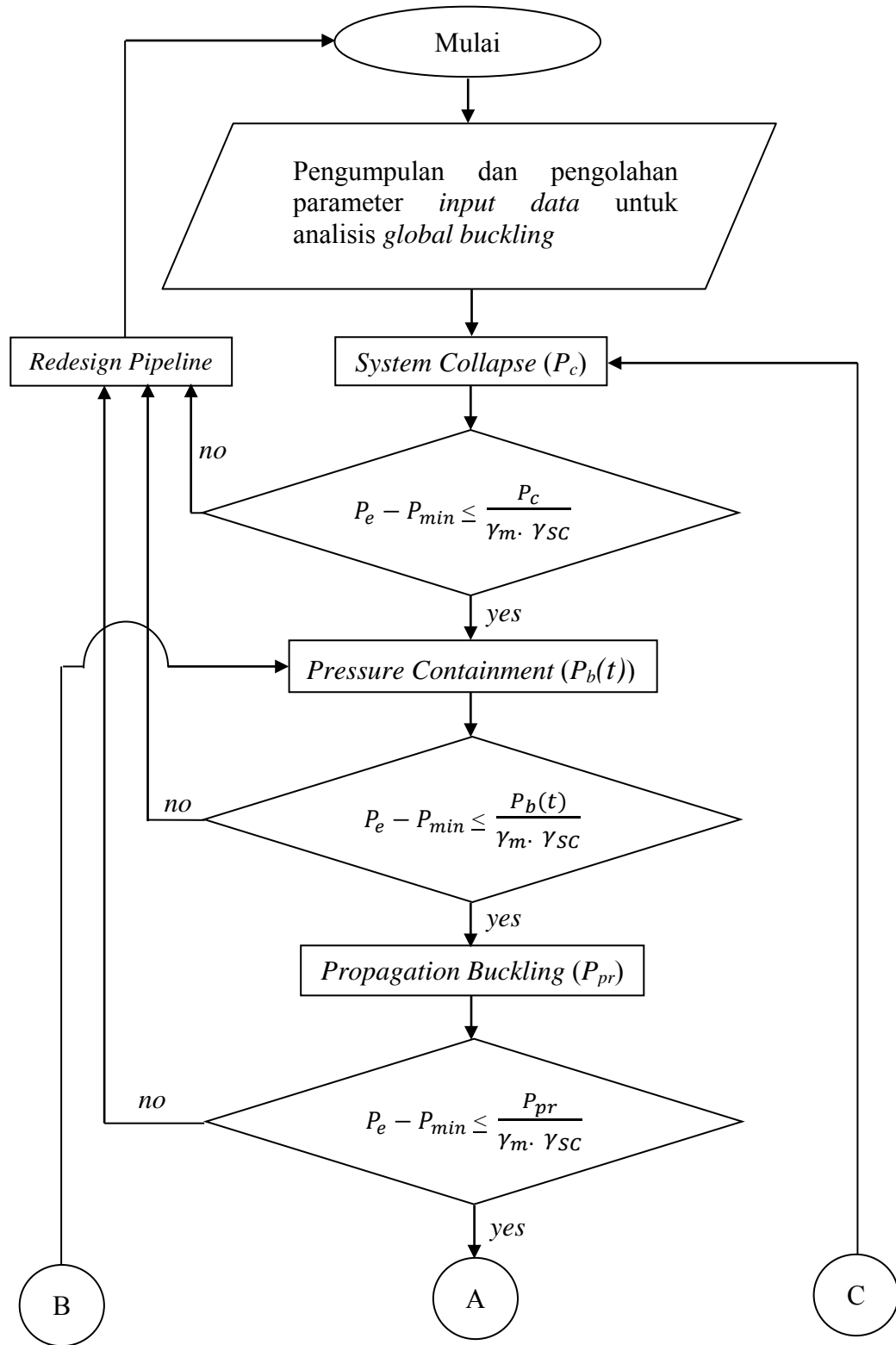


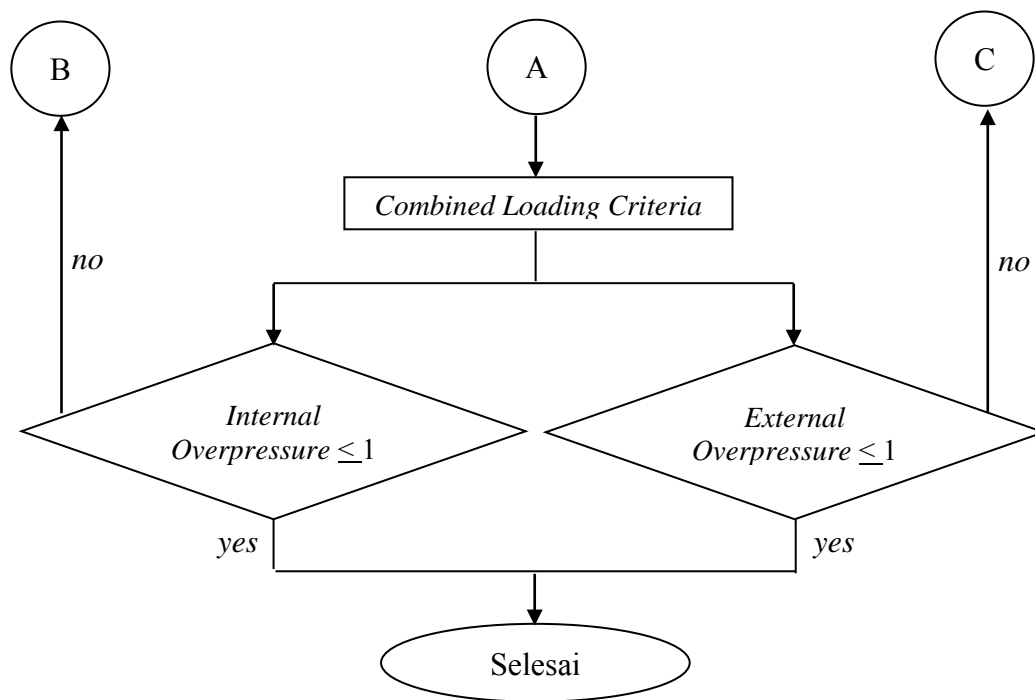




Gambar 3.3 Metodologi analisis tegangan dan kriteria *ASD* pada pipa bawah laut

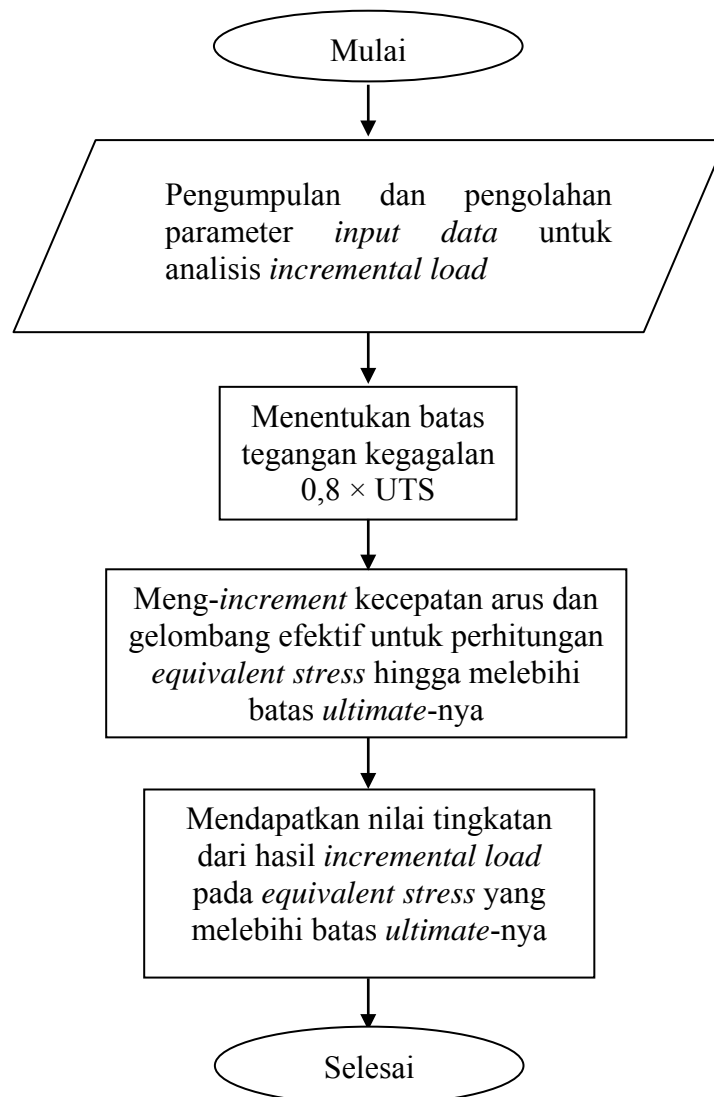
### 3.1.3 Metodologi Analisis Kriteria *Global Buckling* pada Pipa Bawah Laut





Gambar 3.4 Metodologi analisis kriteria *global buckling* pada pipa bawah laut

### 3.1.4 Metodologi *Incremental Load*



Gambar 3.5 Metodologi analisis *incremental load*

### 3.2 Prosedur Penelitian

Tahapan-tahapan dalam melaksanakan penelitian atau analisis pada tugas akhir ini meliputi :

1. Perumusan Masalah

Melakukan perumusan masalah dengan berdiskusi bersama dosen pembimbing tugas akhir dimana tema dari tugas akhir ini didapat saat penulis melaksanakan kerja praktik di PT. PGN, Jakarta Pusat.

## 2. Studi Literatur

Studi literatur ini dilakukan dengan mencari, mempelajari, serta memahami jurnal, buku-buku, dan laporan tugas akhir alumni baik dari institusi sendiri maupun dari institusi lain yang berkaitan dengan rumusan masalah dalam tugas akhir ini. Literatur-literatur tersebut juga digunakan sebagai acuan dalam pengerjaan tugas akhir ini.

## 3. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan saat penulis melakukan kerja praktik yang bertempat di PT. Perusahaan Gas Negara (Persero) Tbk. SBU Transmisi Sumatera-Jawa, Jakarta. Data-data yang didapat serta diperlukan dalam pengerjaan tugas akhir ini antara lain :

- a. Data properti pipa, merupakan data-data yang berhubungan dengan dimensi pipa dan properti-properti yang melekat pada pipa. Data-data tersebut meliputi : panjang pipa, *outside diameter*, *inside diameter*, ketebalan pipa, tebal dan densitas *coating*, toleransi ketebalan korosi, tebal dan densitas *concrete*, luas permukaan pipa bagian dalam, luas permukaan pipa bagian luar, serta luas permukaan baja.
- b. Data material pipa, merupakan data-data sifat material baja penyusun yang digunakan pada pipa bawah laut. Data-data tersebut meliputi : densitas baja, *young modulus*, *poisson's ratio*, *SMYS*, *SMTS*, koefisien ekspansi *thermal*, *derating strength value due to temperature*, *characteristic yield stress*, *characteristic ultimate strength*, *material strength factor*, serta *safety class*
- c. Data lingkungan, merupakan data-data lingkungan yang bersinggungan baik secara langsung ataupun tidak langsung dengan struktur pipa bawah laut. Data-data tersebut meliputi : kedalaman pipa dari permukaan air laut, densitas air laut, viskositas kinematis air, percepatan gravitasi, tinggi gelombang, periode gelombang, panjang gelombang, tinggi gelombang kecepatan arus, *steady current velocity*, ketinggian arus di atas *seabed*, tekanan eksternal, serta *seabed roughness factor*.
- d. Data operasional pipa, merupakan data-data pipa yang digunakan saat beroperasi yang meliputi : *design pressure*, densitas fluida di dalam pipa,

tekanan internal pipa, gaya aksial efektif, dan *maximum design temperature*.

- e. Data penunjang, merupakan data-data tambahan yang digunakan dalam perhitungan tapi tidak tergolong dalam kelompok parameter-parameter di atas. Data-data tersebut meliputi : momen inersia, *design bending moment*, gaya aksial efektif desain, temperatur instalasi, dan *incidental to design pressure ratio*.

#### 4. Mengolah Data

Data-data yang telah didapat tadi lantas diolah dengan langkah-langkah sebagai berikut :

- a. Menentukan Parameter Perhitungan.

Data-data yang didapatkan oleh penulis dikelompokkan masing-masing sesuai dengan parameter perhitungan yang sudah ditetapkan pada DNV OS F101 : *Submarine Pipeline System* 2012, DNV RP F105 : *Free Spanning Pipelines* 2006, dan ABS : *Commentary on the Guide-Buckling and Ultimate Strength Assesment for Offshore Structures* 2005.

- b. Mengkonversi Satuan

Parameter-parameter perhitungan yang digunakan dalam mengerjakan tugas akhir ini disamakan satuannya untuk memudahkan perhitungan agar menghasilkan nilai yang benar dan valid.

- c. Menghitung Panjang *Free Span* Statik

Dalam perhitungan panjang *free span* statik ini nantinya akan didapatkan panjang efektif dari pipa bawah laut dalam kondisi *free span* yang dianalisa secara statis. Penjelasan dari metodologi perhitungan ini adalah sebagai berikut :

- Mengumpulkan data dan mengolahnya dengan menyamakan satuan pada tiap parameter yang digunakan dalam perhitungan panjang *free span* statik.
- Menghitung nilai beban hidrodinamik sesuai dengan Persamaan (2.3) dengan terlebih dahulu mencari nilai dari kecepatan partikel arus dan gelombang efektif yang diperoleh dari perhitungan teori gelombang serta *Reynolds Number*.

- Menghitung nilai dari beban pipa yang terendam sesuai dengan Persamaan (2.17).
  - Dari dua hasil perhitungan di atas, maka nilai dari beban terdistribusi merata dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.2).
  - Menghitung nilai dari tegangan longitudinal akibat beda tekanan dengan menggunakan Persamaan (2.24).
  - Menghitung nilai dari tegangan longitudinal akibat momen lentur dengan menggunakan Persamaan (2.23) dikarenakan nilai dari momen lentur ( $M$ ) belum diketahui nilainya. Nilai  $M$  dicari dengan menggunakan Persamaan (2.25) sehingga nilai  $M$  tersebut dianggap sebagai momen lentur maksimum.
  - Setelah mendapatkan nilai dari momen lentur, maka langkah terakhir dalam perhitungan ini adalah menghitung panjang *free span* statik sesuai dengan Persamaan (2.26).
- d. Menganalisa Tegangan-Tegangan pada Pipa Bawah Laut
- Analisis ini memperhitungkan tegangan-tegangan yang terjadi pada pipa bawah laut serta melakukan pengecekan sesuai dengan kriteria masing-masing. Penjelasan dari metodologinya adalah sebagai berikut :
- Mengumpulkan data dan mengolahnnya dengan menyamakan satuan pada tiap parameter yang digunakan dalam menganalisa tegangan-tegangan pada pipa bawah laut.
  - Menghitung nilai *hoop stress* sesuai dengan Persamaan (2.27).
  - Melakukan pengecekan dengan menggunakan Persamaan (2.37) apakah besar nilai *hoop stress* di atas sesuai dengan kriteria pada DNV OS F101 : *Submarine Pipeline System* 2012 . Jika memenuhi, maka dilanjutkan ke perhitungan parameter *end cap effect stress*. Namun jika tidak memenuhi, maka dilakukan *redesign pipeline*.
  - Menghitung nilai *end cap effect stress* sesuai dengan Persamaan (2.29).
  - Menghitung nilai dari *bending stress* dengan menggunakan Persamaan (2.31) namun terlebih dahulu harus mencari nilai dari beban total pipa ( $q$ ) dan momen tekuk statik maksimum ( $M_B$ ).

- Menghitung nilai *thermal stress* sesuai dengan Persamaan (2.33).
  - Menghitung nilai *poisson stress* dengan menggunakan Persamaan (2.34).
  - Menghitung nilai *longitudinal stress* sesuai dengan Persamaan (2.35).
  - Melakukan pengecekan dengan menggunakan Persamaan (2.38) apakah besar nilai *longitudinal stress* di atas sesuai dengan kriteria pada DNV OS F101 : *Submarine Pipeline System* 2012 . Jika memenuhi, maka dilanjutkan ke perhitungan parameter *equivalent stress*. Namun jika tidak memenuhi, maka dilakukan *redesign pipeline*.
  - Menghitung nilai *equivalent stress* dengan menggunakan Persamaan (2.36).
  - Melakukan pengecekan dengan menggunakan Persamaan (2.39) apakah besar nilai *equivalent stress* di atas sesuai dengan kriteria pada DNV OS F101 : *Submarine Pipeline System* 2012 . Jika memenuhi, maka analisa tegangan pada pipa bawah laut selesai dan tegangan-tegangan yang terjadi bisa dikatakan aman bagi kondisi struktur pipa bawah laut. Namun jika tidak memenuhi, maka dilakukan *redesign pipeline*.
- e. Menganalisa *Global Buckling* pada Pipa Bawah Laut
- Analisis ini merupakan analisis pada kondisi batas *buckling* secara keseluruhan dari *free span* pipa bawah laut yang dianalisis secara statis. Penjelasan dari metodologi pada analisis ini adalah sebagai berikut :
- Mengumpulkan data dan mengolahnya dengan menyamakan satuan pada tiap parameter yang digunakan dalam menganalisa *global buckling* pada pipa bawah laut.
  - Menghitung nilai dari *system collapse* sesuai dengan Persamaan (2.40)
  - Melakukan pengecekan sesuai dengan Persamaan (2.44), apakah *system collapse* telah memenuhi kriteria pada DNV OS F101 : *Submarine Pipeline System* 2012 . Jika memenuhi, maka dilanjutkan



ke perhitungan *pressure containment*. Namun jika tidak memenuhi, maka dilakukan *redesign pipeline*.

- Menghitung nilai dari *pressure containment* sesuai dengan Persamaan (2.47)
- Melakukan pengecekan sesuai dengan Persamaan (2.45), apakah *pressure containment* telah memenuhi kriteria pada DNV OS F101 : *Submarine Pipeline System 2012* . Jika memenuhi, maka dilanjutkan ke perhitungan *propagation buckling*. Namun jika tidak memenuhi, maka dilakukan *redesign pipeline*.
- Menghitung nilai dari *propagation buckling* sesuai dengan Persamaan (2.48)
- Melakukan pengecekan sesuai dengan Persamaan (2.49), apakah *propagation buckling* telah memenuhi kriteria pada DNV OS F101 : *Submarine Pipeline System 2012* . Jika memenuhi, maka dilanjutkan ke perhitungan *combined loading criteria*. Namun jika tidak memenuhi, maka dilakukan *redesign pipeline*.
- Menghitung nilai *combined loading criteria* yang terdiri dari *internal overpressure* pada Persamaan (2.50) dan *external overpressure* pada Persamaan (2.57).
- Melakukan pengecekan pada kedua parameter di atas apakah sudah sesuai dengan kriteria pada DNV OS F101 : *Submarine Pipeline System 2012*. Jika *internal overpressure* tidak memenuhi kriteria, maka dilakukan pengecekan ulang terhadap perhitungan *pressure containment*. Sedangkan jika *external overpressure* tidak memenuhi kriteria, maka dilakukan pengecekan ulang terhadap perhitungan *system collapse*. Jika kedua parameter tersebut telah memenuhi kriteria, maka *buckling* pada pipa bawah laut dikatakan aman.

f. Menghitung *Incremental Load*

Metode ini merupakan metode yang digunakan untuk mencari batas kegagalan struktur pipa bawah laut ketika diberikan beban yang ditingkatkan secara bertahap hingga diketahui pada tegangan berapa

struktur pipa akan mengalami kegagalan. Penjelasan dari metodologi *incremental load* ini adalah sebagai berikut :

- Mengumpulkan data dan mengolahnya dengan menyamakan satuan pada tiap parameter yang digunakan dalam perhitungan ini.
- Menentukan batas tegangan kegagalan dengan menggunakan *standard code* ABS 2005 yakni  $0.8 \times \text{Ultimate Tensile Strength}$ .
- Meningkatkan kecepatan arus dan gelombang efektif secara bertahap untuk perhitungan *drag force* hingga *equivalent stress* sampai mendapatkan nilai dari hasil increment pada *equivalent stress* yang melebihi batas *ultimate*-nya.

5. Analisis dan Pembahasan

Dengan mengacu pada DNV OS F101 : *Submarine Pipeline System* 2012, DNV RP F105 : *Free Spanning Pipelines* 2006, serta ABS : *Commentary on the Guide-Buckling and Ultimate Strength Assesment for Offshore Structures* 2005, parameter-parameter perhitungan dihitung dan dianalisa sesuai dengan metode-metode yang telah tercantum dalam Bab III ini. Serta dilakukan pengecekan apakah pipa bawah laut telah memenuhi syarat dan ketentuan dari *Ultimate Limit State (ULS)* yang dianalisis secara statis tersebut.

6. Pemodelan

Pemodelan dengan ANSYS 15.0 dalam tugas akhir ini bertujuan untuk menggambarkan secara visual keadaan pipa bawah laut yang telah dianalisa.

7. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan, nantinya akan ditarik beberapa kesimpulan dari hasil analisis tersebut dan juga pemberian saran-saran bagi yang ingin melanjutkan tugas akhir ini.

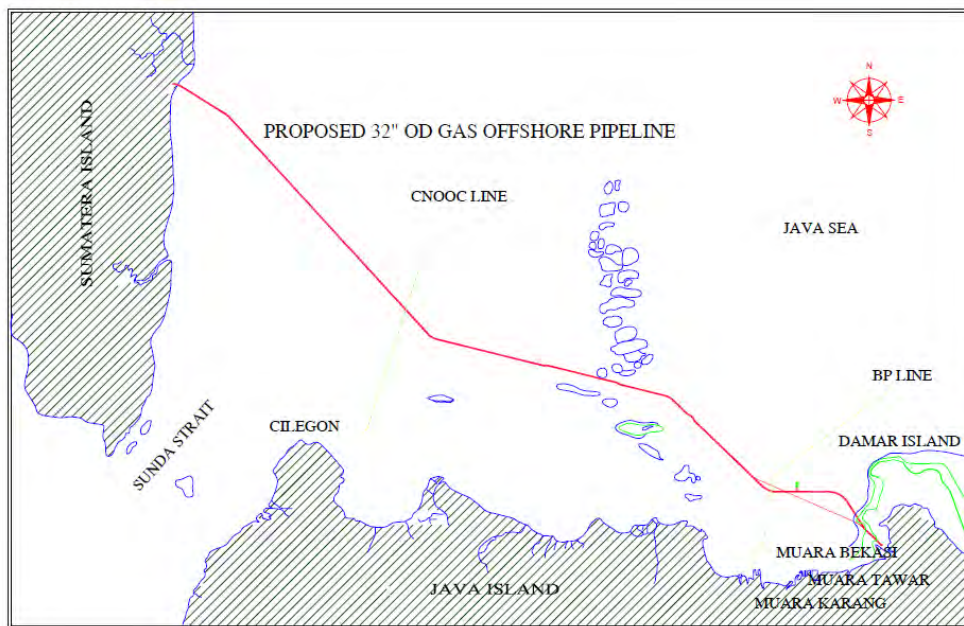
*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB IV

### ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

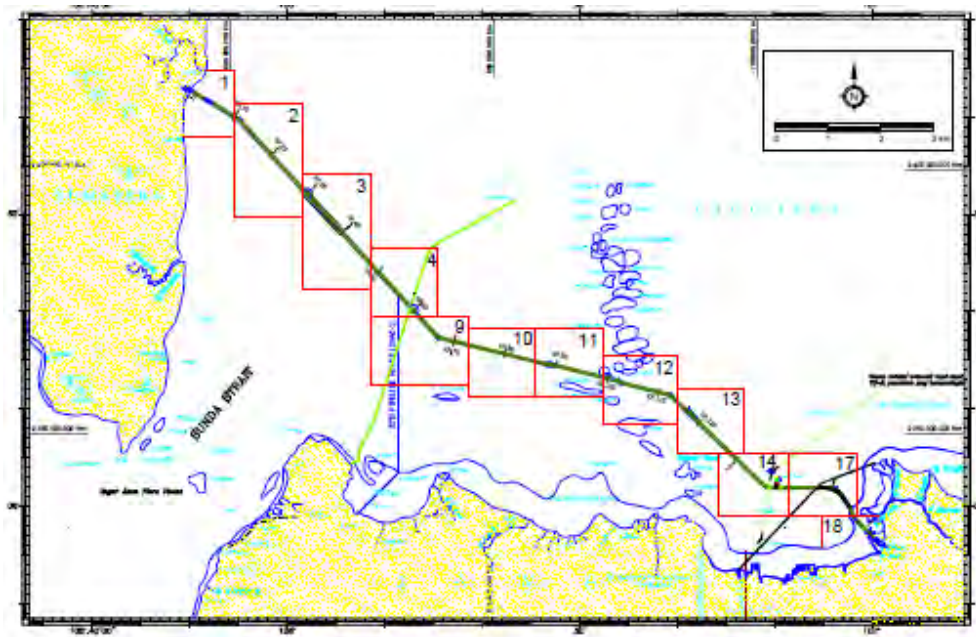
#### 4.1 Data-Data

Data-data yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah data pipa milik PT. Perusahaan Gas Negara (Persero) Tbk. dengan nama proyek *South Sumatera–West Java Gas Pipeline Project Phase II Labuhan Maringgai–Muara Bekasi Offshore Pipeline*. Jaringan pipa ini merupakan pipa transmisi yang mendistribusikan gas dari Labuhan Maringgai ke Muara Bekasi dan melewati Selat Sunda dengan memiliki panjang sekitar 161 km dan dengan spesifikasi pipa 32”×65 serta *design pressure* sebesar 1150 *Psig*.

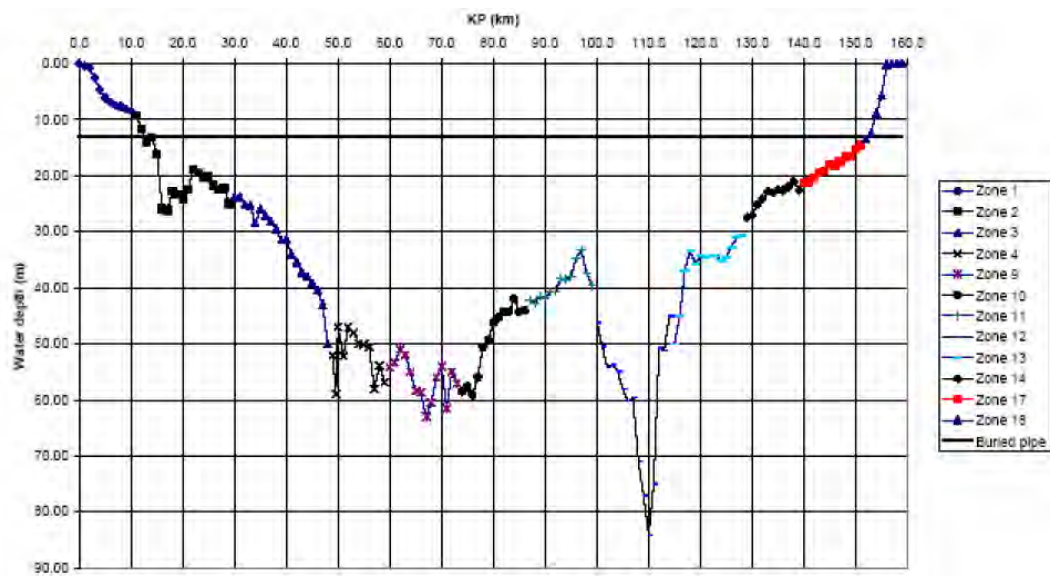


Gambar 4.1 Peta jalur *offshore pipeline SSWJ project phase II* (PGN, 2005)

Jalur pipa sepanjang 161 km tersebut dibagi menjadi 12 zona dimana tiap-tiap zona memiliki kedalaman, karakteristik gelombang, dan karakteristik arus masing-masing. Pembagian zona ini berfungsi untuk memudahkan dalam proses perancangan serta pengawasan dan *maintenance* pada jalur pipa bawah laut tersebut. Adapun pembagian zona pada jalur pipa bawah laut milik PGN dapat dilihat seperti gambar di bawah ini :



Gambar 4.2 Pembagian zona pada jalur pipa transmisi Sumatera-Jawa  
(PGN, 2005)

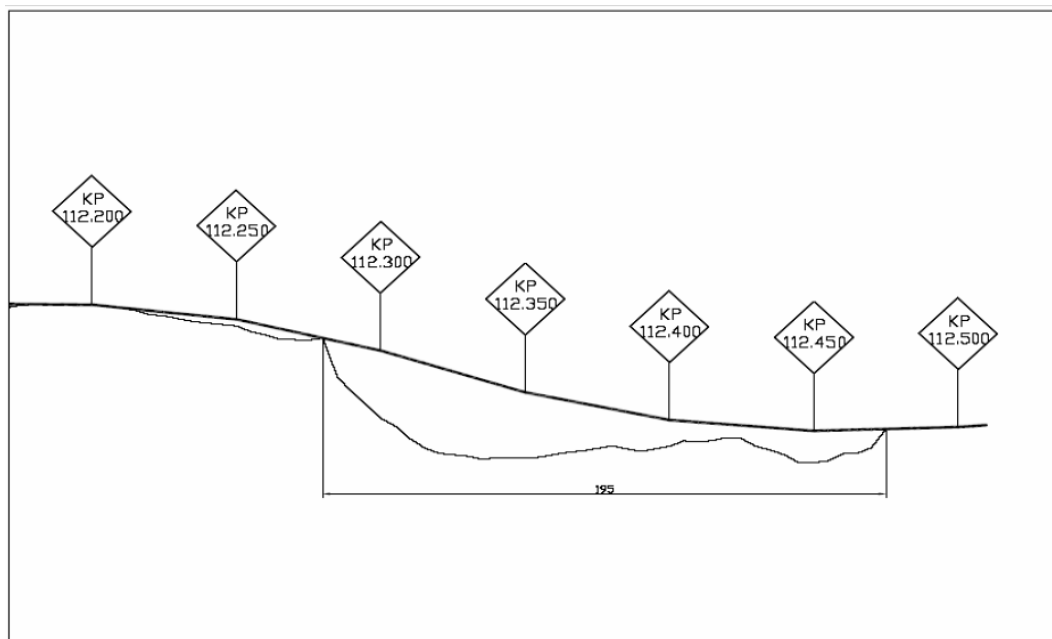


Gambar 4.3 Profil *seabed* dari jalur yang dilewati *offshore pipeline*  
(PGN, 2005)

Tabel 4.1 Data Lingkungan dengan Periode Ulang 100 Tahun-an (PGN, 2005)

| Zones                            | Z1   | Z2   | Z3   | Z4   | Z9   | Z10  | Z11  | Z12  | Z13  | Z14  | Z17  | Z18  |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>WAVES</b>                     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Significant Wave Height (Hs) (m) | 4.1  | 4.13 | 4.49 | 4.98 | 4.98 | 4.98 | 4.49 | 4.98 | 5.03 | 4.73 | 3.80 | 3.46 |
| Spectral peak period (Ts) (sec)  | 8.18 | 8.21 | 8.55 | 9    | 9    | 9    | 8.55 | 9    | 9.04 | 8.77 | 7.88 | 7.52 |
| <b>CURRENT SPEED</b>             |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| At 0% of depth                   | 1.72 | 1.36 | 1.7  | 1.6  | 1.57 | 1.53 | 1.58 | 1.55 | 1.61 | 1.26 | 1.28 | 1.42 |
| 10% of depth                     | 1.18 | 0.81 | 0.95 | 0.85 | 0.82 | 0.78 | 0.83 | 0.8  | 0.86 | 0.73 | 0.75 | 0.89 |
| 20% of depth                     | 1.17 | 0.8  | 0.93 | 0.83 | 0.81 | 0.76 | 0.82 | 0.79 | 0.84 | 0.72 | 0.74 | 0.88 |
| 30% of depth                     | 1.16 | 0.79 | 0.91 | 0.82 | 0.79 | 0.75 | 0.8  | 0.77 | 0.82 | 0.71 | 0.73 | 0.87 |
| 40% of depth                     | 1.15 | 0.78 | 0.89 | 0.79 | 0.76 | 0.72 | 0.77 | 0.75 | 0.8  | 0.69 | 0.71 | 0.85 |
| 50% of depth                     | 1.13 | 0.76 | 0.85 | 0.76 | 0.73 | 0.69 | 0.74 | 0.71 | 0.77 | 0.67 | 0.69 | 0.83 |
| 60% of depth                     | 1.1  | 0.74 | 0.81 | 0.71 | 0.68 | 0.51 | 0.69 | 0.66 | 0.72 | 0.64 | 0.66 | 0.8  |
| 70% of depth                     | 1.07 | 0.7  | 0.74 | 0.64 | 0.62 | 0.58 | 0.63 | 0.6  | 0.65 | 0.6  | 0.62 | 0.76 |
| 80% of depth                     | 1.02 | 0.65 | 0.66 | 0.56 | 0.53 | 0.49 | 0.54 | 0.51 | 0.57 | 0.54 | 0.56 | 0.7  |
| 90% of depth                     | 0.96 | 0.59 | 0.53 | 0.44 | 0.41 | 0.37 | 0.42 | 0.39 | 0.45 | 0.47 | 0.49 | 0.63 |
| 100% of depth                    | 0.87 | 0.5  | 0.37 | 0.27 | 0.24 | 0.2  | 0.25 | 0.23 | 0.28 | 0.36 | 0.38 | 0.52 |

Sesuai dengan batasan masalah pada tugas akhir ini, pipa bawah laut diketahui dalam kondisi *free span* dan *span* yang dianalisa adalah *span* #35 pada *Kilometer Point* 112,3 – 112,5. Profil dari kondisi *span* #35 dapat dilihat pada gambar di bawah ini :



Gambar 4.4 Profil *span* #35 (PGN, 2005)

Dalam melakukan perhitungan *Ultimate Limit State (ULS)*, maka dibutuhkan data-data input yang meliputi : data properti pipa, data material pipa, data operasional pipa, data lingkungan, dan data penunjang. Detail dari data-data tersebut akan dijabarkan pada tabel-tabel di bawah ini :

#### 4.1.1 Data Properti Pipa

Data properti pipa dalam tugas akhir ini dapat dilihat pada tabel berikut ini :

Tabel 4.2 Data Properti Pipa

| <i>Description</i>                   | <i>Symbol</i> | <i>Value</i> | <i>Unit</i>      |
|--------------------------------------|---------------|--------------|------------------|
| <i>Length of Pipe</i>                | $L_p$         | 195          | m                |
| <i>Outside Diameter</i>              | $OD$          | 0.8128       | m                |
| <i>Inside Diameter</i>               | $ID$          | 0.781        | m                |
| <i>Wall Thickness</i>                | $WT$          | 0.0159       | m                |
| <i>Concrete Coating Thickness</i>    | $t_{cc}$      | 0.06         | m                |
| <i>Concrete Coating Density</i>      | $\rho_{cc}$   | 29851.83     | N/m <sup>3</sup> |
| <i>Corrosion Allowance</i>           | $t_{CA}$      | 0.0015       | m                |
| <i>Corrosion Coating Thickness</i>   | $t_{corr}$    | 0.0025       | m                |
| <i>Corrosion Coating Density</i>     | $\rho_{corr}$ | 12556.8      | N/m <sup>3</sup> |
| <i>Internal Cross Sectional Area</i> | $A_i$         | 0.48         | m <sup>2</sup>   |
| <i>External Cross Sectional Area</i> | $A_e$         | 0.52         | m <sup>2</sup>   |
| <i>Steel Cross Sectional Area</i>    | $A_s$         | 0.04         | m <sup>2</sup>   |

#### 4.1.2 Data Material Pipa

Data material pipa dalam tugas akhir ini dapat dilihat pada tabel berikut ini :

Tabel 4.3 Data Material Pipa

| <i>Description</i>     | <i>Symbol</i> | <i>Value</i> | <i>Unit</i>      |
|------------------------|---------------|--------------|------------------|
| <i>Steel Density</i>   | $\rho_s$      | 77008.5      | N/m <sup>3</sup> |
| <i>Young's Modulus</i> | $E$           | 207000000000 | Pa               |
| <i>Poisson's Ratio</i> | $\nu$         | 0.3          |                  |

Lanjutan Tabel 4.3 Data Material Pipa

|   |              |                     |                 |
|---|--------------|---------------------|-----------------|
| <i>Specified Minimum Yield Stress</i>             | <i>SMYS</i>  | 450000000           | Pa              |
| <i>Specified Minimum Tensile Strength</i>         | <i>SMTS</i>  | 535000000           | Pa              |
| <i>Coefficient of Thermal Expansion</i>           | $\alpha_T$   | $12 \times 10^{-6}$ | C <sup>-1</sup> |
| <i>Derating Strength Value due to Temperature</i> | $f_{y,temp}$ | 0                   | Pa              |
| <i>Characteristic Yield Stress</i>                | $f_y$        | 432000000           | Pa              |
| <i>Characteristic Ultimate Strength</i>           | $f_u$        | 513600000           | Pa              |
| <i>Material Strength Factor</i>                   | $\alpha_u$   | 0.96                |                 |
| <i>Safety Class</i>                               | <i>LOW</i>   |                     |                 |

#### 4.1.3 Data Lingkungan

Data lingkungan yang disajikan dalam tugas akhir ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 4.4 Data Lingkungan

| <i>Description</i>                     | <i>Symbol</i> | <i>Value</i>          | <i>Unit</i>       |
|--|---------------|-----------------------|-------------------|
| <i>Acceleration of Gravity</i>         | $g$           | 9.8                   | m/s <sup>2</sup>  |
| <i>Water Depth</i>                     | $d$           | 62                    | m                 |
| <i>Density of Water</i>                | $\rho$        | 10055.25              | N/m <sup>3</sup>  |
| <i>Kinematic Viscosity of Seawater</i> | $\nu$         | $1.05 \times 10^{-6}$ | m <sup>2</sup> /s |
| <i>Wave Length</i>                     | $L$           | 138.294               | m                 |
| <i>Wave Height</i>                     | $H$           | 4.98                  | m                 |
| <i>Wave Period</i>                     | $T$           | 9.45                  | s                 |
| Kedalaman titik tinjau dari <i>MSL</i> | $y$           | -61.534               | m                 |
| <i>Height of Pipe Above Seabed</i>     | $y_{pipe}$    | 0                     | m                 |
| <i>Seabed Roughness Factor</i>         | $Z_o$         | $5.21 \times 10^{-6}$ | m                 |
| <i>External Pressure</i>               | $P_e$         | 620000                | Pa                |
| <i>Steady Current Velocity</i>         | $U_r$         | 0.21                  | m/s               |
| Ketinggian Arus di atas <i>Seabed</i>  | $Z_r$         | 1                     | m                 |



#### 4.1.4 Data Operasional Pipa

Data operasional pipa dalam tugas akhir ini dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.5 Data Operasional Pipa

| <i>Description</i>                | <i>Symbol</i> | <i>Value</i> | <i>Unit</i>      |
|-----------------------------------|---------------|--------------|------------------|
| <i>Design Pressure</i>            | $P_d$         | 7930000      | Pa               |
| <i>Maximum Design Temperature</i> | $T_{max}$     | 35           | °C               |
| <i>Contents Density</i>           | $\rho_{cont}$ | 490.5        | N/m <sup>3</sup> |
| <i>Internal Pressure</i>          | $P_i$         | 7240000      | Pa               |
| <i>Effective Axial Force</i>      | $S_{eff}$     | -517669      | N                |

#### 4.1.5 Data Penunjang

Data penunjang disini adalah data-data yang tidak tergolong dalam kelompok data tabel diatas, namun diperlukan dalam analisis perhitungan. Data-data tersebut dapat dilihat pada tabel berikut ini :

Tabel 4.6 Data Penunjang

| <i>Description</i>                          | <i>Symbol</i>  | <i>Value</i>           | <i>Unit</i>    |
|---|----------------|------------------------|----------------|
| Momen Inersia                               | $I$            | $3.161 \times 10^{-3}$ | m <sup>4</sup> |
| <i>Design Bending Moment</i>                | $M_{sd}$       | 1623400                | Nm             |
| Gaya Aksial Afektif Desain                  | $S_{sd}$       | 127000                 | Nm             |
| <i>Installation Temperature</i>             | $T_{min}$      | 26                     | °C             |
| <i>Incidental to Design Pressure Ratios</i> | $\gamma_{inc}$ | 1.1                    |                |

#### 4.2 Perhitungan Analisis *Ultimate Limit State* (ULS)

##### 4.2.1 Perhitungan Analisis *Free Span* Statik pada Pipa Bawah Laut

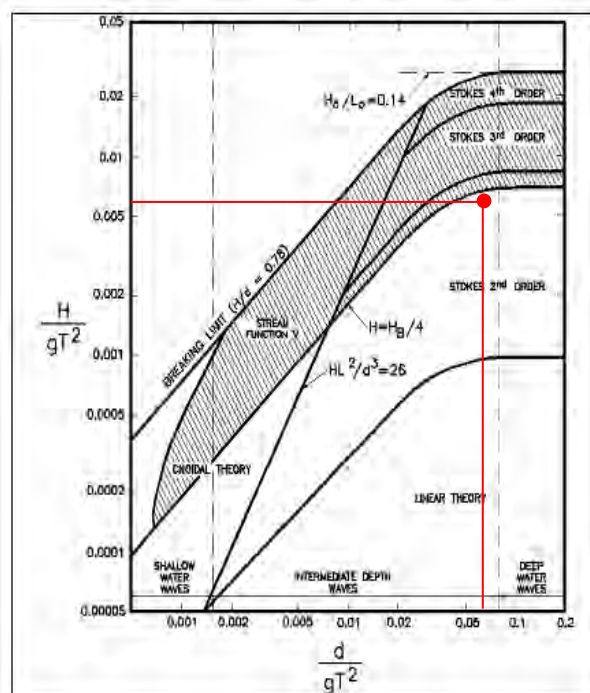
Perhitungan ini dilakukan untuk mencari nilai dari parameter-parameter yang digunakan untuk mencari panjang *free span* statik pipa bawah laut. Berdasarkan rumus-rumus yang tersedia pada Bab II dan dilengkapi dengan langkah-langkahnya pada Bab III, maka perhitungan ini menghasilkan nilai-nilai sebagai berikut :

#### 4.2.1.1 Perhitungan Beban Hidrodinamik

Untuk mencari nilai kecepatan partikel air adalah dengan menentukan teori gelombang yang akan dipakai dalam perhitungan. Berdasarkan Persamaan (2.6), maka diperoleh nilai :

$$\left[ \frac{H}{gT^2} \right] = 0.00569 \text{ dan } \left[ \frac{d}{gT^2} \right] = 0.070844$$

Setelah mendapatkan hasil diatas, langkah selanjutnya adalah menarik garis lurus pada grafik daerah aplikasi teori gelombang *Regions of Validity of Wave Theories*, sehingga garis tersebut akan bertemu pada satu titik. Dari penarikan garis lurus tersebut, maka dihasilkan teori gelombang yang dipakai dalam perhitungan kecepatan partikel air adalah teori gelombang *stokes* orde dua.



Gambar 4.5 Hasil perhitungan penentuan teori gelombang

Setelah menentukan teori gelombang, maka langkah selanjutnya adalah mencari nilai kecepatan horizontal partikel air dengan menggunakan

Persamaan (2.7). Hasil dari perhitungan tersebut beserta parameternya adalah sebagai berikut:

Tabel 4.7 Hasil Perhitungan Kecepatan Horizontal Partikel Air

| Deskripsi                         | Simbol   | Nilai      | Satuan           |
|-----------------------------------|----------|------------|------------------|
| Angka Gelombang                   | $k$      | 0.045411   | -                |
| Sudut Fase                        | $\theta$ | 45         | °                |
| Frekuensi Gelombang               | $\omega$ | 0.66455026 | -                |
| Kecepatan Horizontal Partikel Air | $U$      | 0.141      | m/s <sup>2</sup> |

Selanjutnya adalah mencari nilai kecepatan partikel gelombang efektif ( $U_w$ ) yang mana rumusnya adalah sama dengan Persamaan (2.12) sehingga nilainya adalah 0.167 m/s. Setelah itu menghitung kecepatan partikel arus efektif ( $U_c$ ) juga dengan menggunakan Persamaan (2.12), namun sebelum menghitung  $U_c$ , terlebih dahulu mencari kecepatan partikel arus ( $U_D$ ) dengan menggunakan Persamaan (2.14) dan menghasilkan  $U_D$  sebesar 0.135 m/s. Dengan didapatkannya nilai  $U_D$ , maka nilai  $U_c$  adalah 0.014 m/s. Setelah mendapatkan nilai  $U_w$  dan  $U_c$ , maka kedua kecepatan tersebut ditambahkan dengan cara meresultan kedua persamaan tersebut sehingga nilai kecepatan arus dan gelombang efektif ( $U_e$ ) sesuai dengan Persamaan (2.15) adalah 0.175 m/s

Langkah selanjutnya adalah menentukan nilai koefisien *drag* dan koefisien inersia dengan terlebih dahulu mencari nilai *Reynolds Number*. Dengan menggunakan Persamaan (2.16), maka didapatkan nilai  $R_e = 2.04 \times 10^5$ . Setelah mendapatkan nilai  $R_e$ , langkah berikutnya adalah menentukan koefisien hidrodinamik dengan menyesuaikan nilai  $R_e$  terhadap tabel *Recommended Hydrodynamics Coefficient (Mouselli, 1981)*, dan didapatkan hasil nilai  $C_D = 1.01$  dan  $C_M = 2$

Tabel 4.8 Hasil Perhitungan Koefisien Hidrodinamik

| <i>Reynolds number (<math>R_e</math>)</i> | <i>Hydrodynamic Coefficient</i>    |                                   |                                   |
|---|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|   | $C_D$                              | $C_L$                             | $C_M$                             |
| $R_e < 5.0 \times 10^4$                   | 1.3                                | 1.5                               | 2.0                               |
| $5.0 \times 10^4 < R_e < 1.0 \times 10^5$ | 1.6                                | 1.0                               | 2.0                               |
| $1.0 \times 10^5 < R_e < 2.5 \times 10^5$ | $1.53 - \frac{R_e}{3 \times 10^5}$ | $1.2 - \frac{R_e}{5 \times 10^5}$ | 2.0                               |
| $2.5 \times 10^5 < R_e < 5.0 \times 10^5$ | 0.7                                | 0.7                               | $2.5 - \frac{R_e}{5 \times 10^5}$ |
| $R_e > 5.0 \times 10^5$                   | 0.7                                | 0.7                               | 1.5                               |

Setelah mendapatkan nilai dari kecepatan partikel arus dan gelombang efektif dan nilai koefisien *drag* serta koefisien inertia, maka nilai beban hidrodinamik sesuai dengan Persamaan (2.3) dapat dihitung dan menghasilkan nilai beban hidrodinamik ( $F_H$ ) sebesar 256.37 N/m

#### 4.2.1.2 Perhitungan Beban Pipa Terendam

Perhitungan selanjutnya adalah menghitung nilai dari beban pipa terendam ( $W_{sub}$ ). Berat pipa terendam merupakan jumlah dari berat pipa itu sendiri, ditambah dengan berat *corrosion coating*, berat *concrete coating*, dan berat isi pipa, dikurangi dengan gaya apung pipa. Dengan menggunakan Persamaan (2.17), maka didapatkan hasil :

Tabel 4.9 Hasil Perhitungan Beban Pipa Terendam

| Deskripsi                 | Simbol     | Nilai   | Satuan |
|---------------------------|------------|---------|--------|
| Berat Pipa Baja           | $W_{st}$   | 3083.04 | N/m    |
| Berat Lapisan Anti Korosi | $W_{corr}$ | 2143.37 | N/m    |
| Berat Selimut Beton       | $W_{cc}$   | 4134.73 | N/m    |
| Berat Isi Pipa            | $W_{cont}$ | 234.9   | N/m    |
| Berat Gaya Apung          | $W_{buoy}$ | 6204.2  | N/m    |
| Berat Pipa Terendam       | $W_{sub}$  | 3391.84 | N/m    |

#### 4.2.1.3 Perhitungan Beban Terdistribusi Merata

Perhitungan ini mengasumsikan beban pada pipa adalah terdistribusi merata. Dengan didapatkannya nilai beban hidrodinamik dan beban pipa terendam di atas, maka nilai beban terdistribusi merata menurut Persamaan (2.2) adalah sebesar 3401.515 N/m

#### 4.2.1.4 Perhitungan Tegangan Longitudinal Akibat Beda Tekanan

Besar nilai tegangan longitudinal akibat beda tekanan yang didapat dari Persamaan (2.24) adalah  $6.59 \times 10^7 \text{ N/m}^2$

#### 4.2.1.5 Perhitungan Tegangan Longitudinal Akibat Momen Lentur

Besar nilai tegangan longitudinal akibat momen lentur didapatkan dari persamaan cek batas tegangan longitudinal dikarenakan variabel  $M$  belum diketahui nilainya. Dengan menggunakan Persamaan (2.25), maka didapatkan nilai  $M$  adalah  $1.99 \times 10^6 \text{ Nm}$  sebagai momen lentur maksimum.

#### 4.2.1.6 Perhitungan Panjang *Free Span* Statik

Dari perhitungan-perhitungan parameter di atas dan telah didapatkannya nilai momen lentur, maka dengan menggunakan Persamaan (2.26), panjang *free span* statik adalah 194.89 m.

### 4.2.2 Perhitungan Analisis Tegangan-Tegangan pada Pipa Bawah Laut

Perhitungan ini merupakan perhitungan terhadap tegangan-tegangan yang terjadi pada *subsea pipeline* dimana tegangan-tegangan tersebut tidak boleh melebihi batas yang diizinkan. Berikut hasil perhitungan tegangan-tegangan pada *offshore pipelines* :

#### 4.2.2.1 Perhitungan *Hoop Stress*

Ketika pipa beroperasi, tentunya tegangan ini memiliki batas yang jika batas tersebut dilewati, maka struktur pipa akan mengalami kegagalan. Batas ini akan dihitung pada sub bab analisis *ULS*. Dengan melihat

Persamaan (2.27), maka besar dari tegangan *hoop stress* ini adalah  $1.66 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ .

#### 4.2.2.2 Perhitungan Tegangan *End Cap Effect*

Tegangan fluida di dalam pipa yang berada pada ujung pipa yang tertutup memiliki pengaruh terhadap *bending* yang terjadi pada pipa sehingga tegangan ini tidak boleh diabaikan. Tegangan ini sangat dipengaruhi oleh nilai *hoop stress* dimana besar dari tegangan *end cap effect* adalah nilai *hoop stress* dibagi dua. Dengan menggunakan Persamaan (2.29), maka besar dari tegangan ini adalah  $8.29 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ .

#### 4.2.2.3 Perhitungan *Bending Stress*

Momen tekuk yang dialami pipa yang diakibatkan oleh beban-beban pada pipa tersebut dapat mengakibatkan tegangan *bending*. Oleh karena itu, beban total pada pipa perlu diketahui untuk mengecek apakah *bending* yang terjadi nantinya tidak melebihi batas. Untuk mencari nilai dari beban total pada pipa dapat menggunakan Persamaan (2.30). Dari persamaan tersebut, dapat diketahui besar beban total pipa adalah 3401.52 N/m.

Langkah selanjutnya adalah menghitung momen tekuk statik maksimum ( $M_B$ ) dimana persamaannya dapat dilihat pada Persamaan (2.32). Dalam persamaan tersebut terdapat variabel  $C$  dimana variabel tersebut merupakan konstanta kondisi batas perletakan dari pipa bawah laut. Dalam kasus ini, tipe perletakan diasumsikan *pinned roll to pinned* sehingga nilai  $C$  adalah 8.0. Dengan diketahuinya nilai dari konstanta kondisi batas perletakan, maka besar momen tekuk statik maksimum adalah  $1.29 \times 10^7 \text{ Nm}$ . Setelah mendapatkan nilai  $M_B$ , maka dengan melihat Persamaan (2.31), dapat diketahui besar *maximum bending stress* adalah  $1.23 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ .

#### 4.2.2.4 Perhitungan *Thermal Stress*

Tegangan ini terjadi karena adanya proses pemuaian yang terjadi pada pipa. Karakteristik material menjadi hal yang sangat penting untuk diperhitungkan karena jika *thermal stress* melebihi kemampuan material untuk memuai, maka akan terjadi keretakan pada pipa. Dengan menggunakan Persamaan (2.33), besar dari *thermal stress* adalah  $2.24 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup>.

#### 4.2.2.5 Perhitungan *Poisson Stress*

Tegangan ini diakibatkan adanya tegangan residual pada saat fabrikasi pipa sehingga menyebabkan pipa harus kembali ke keadaan semula. Maka, kembalinya pipa ke keadaan semula menyebabkan terjadinya gaya aksial sehingga mengakibatkan kontraksi pada dinding pipa. Dengan menggunakan Persamaan (2.34), maka nilai tegangan *poisson* adalah  $4.98 \times 10^7$  Pa.

#### 4.2.2.6 Perhitungan *Longitudinal Stress*

Tegangan ini merupakan tegangan kombinasi antara *bending stress*, *end cap effect stress*, *thermal stress*, dan *poisson stress*. Persamaan (2.35) merupakan persamaan untuk melakukan perhitungan *longitudinal stress* dan dari persamaan tersebut didapatkan nilai *longitudinal stress* adalah  $2.78 \times 10^8$  Pa.

#### 4.2.2.7 Perhitungan *Equivalent Stress*

Tegangan ini merupakan resultan dari keseluruhan komponen tegangan yang terjadi pada pipa. Dengan melihat Persamaan (2.36), maka besar dari *Equivalent Stress* adalah  $2.42 \times 10^8$  Pa.

#### 4.2.2.8 Perhitungan Analisis Kriteria *Allowable Stress Design (ASD)*

Sesuai dengan DNV OS F101 : *Submarine Pipeline System* 2012, *Allowable Stress Design* atau yang biasa disingkat *ASD* merupakan batas izin tegangan-tegangan yang terjadi pada pipa. Jika tegangan yang terjadi

melebihi syarat sesuai *standard code*, maka dipastikan akan terjadi kegagalan struktur pada pipa baik berupa retak, *buckling*, ataupun patah.

Sebelum melakukan analisis persamaan-persamaan batas izin tegangan, terlebih dahulu mencari nilai dari variabel-variabel persamaan yang belum diketahui nilainya. Pada Persamaan (2.37), (2.38), dan (2.39) terdapat variabel  $\eta$  yang melambangkan *usage factor*. Untuk memperoleh nilai *usage factor*, data material yang dipakai adalah *material strength factor* ( $\alpha_U$ ) dan *safety class*. Pada Tabel 4.3, di ketahui nilai  $\alpha_U$  adalah 0.96 dengan *safety class low*. Kemudian disesuaikan dengan Table 5-16 pada DNV OS F101 2012, sehingga diperoleh nilai *usage factor* adalah 1.00.

Tabel 4.10 *Usage Factors* untuk Pengecekan Tegangan Ekvivalen

| Table 5-16 Usage factors for equivalent stress check |              |        |      |
|--|--------------|--------|------|
|  | Safety class |        |      |
|  | Low          | Medium | High |
| $\eta$   | 1.00         | 0.90   | 0.80 |

Berikut hasil pengecekan *stress* terhadap ASD :

Tabel 4.11 Hasil Analisis *Allowable Stress Design* (ASD)

|                            |             |        |                                      |
|----------------------------|-------------|--------|--------------------------------------|
| <b>Hoop Stress</b>         | $\sigma_H$  | $\leq$ | $\eta \cdot (SMYS \cdot f_{y,temp})$ |
|                            | 165895534.6 | $\leq$ | 450000000                            |
|                            | memenuhi    |        |                                      |
| <b>Longitudinal Stress</b> | $\sigma_L$  | $\leq$ | $\eta \cdot f_y$                     |
|                            | 277688742.1 | $\leq$ | 432000000                            |
|                            | memenuhi    |        |                                      |
| <b>Equivalent Stress</b>   | $\sigma_E$  | $\leq$ | $\eta \cdot f_y$                     |
|                            | 242002156.1 | $\leq$ | 432000000                            |
|                            | memenuhi    |        |                                      |



### 4.2.3 Perhitungan Analisis Kriteria *Global Buckling* pada Pipa Bawah Laut

#### 4.2.3.1 Perhitungan *System Collapse*

Pada dasarnya, prinsip dari *system collapse* ini adalah tekanan eksternal di sekitar pipa bawah laut harus kurang dari sama dengan karakteristik tekanan *collapse*. Dengan menggunakan Persamaan (2.40), maka nilai dari karakteristik tekanan *collapse* tersebut dapat diketahui. Dalam persamaan tersebut, ada beberapa parameter yang harus diketahui terlebih dahulu nilainya yaitu tekanan *collapse* elastis yang dinyatakan dalam Persamaan (2.41), tekanan *collapse* plastis pada Persamaan (2.42), dan ovalisasi pada Persamaan (2.43).

Pada Persamaan (2.42), terdapat variabel faktor fabrikasi ( $\alpha_{fab}$ ) dimana pada batasan masalah di Bab I, sudah dijelaskan bahwa variabel ini diasumsikan *seamless*. Dengan melihat *Table 5-5* pada DNV OS F101 2012, maka nilai dari faktor fabrikasi tersebut adalah 1.00.

Tabel 4.12 Faktor Fabrikasi Maksimum

| Table 5-5 Maximum fabrication factor, $\alpha_{fab}$ |          |                |      |
|--|----------|----------------|------|
| Pipe   | Seamless | UO & TRB & ERW | UOE  |
| $\alpha_{fab}$                                       | 1.00     | 0.93           | 0.85 |

Hasil dari masing-masing perhitungan persamaan di atas dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 4.13 Hasil Perhitungan Karakteristik Tekanan *Collapse*

| Description                           | Symbol   | Value              | Unit |
|---------------------------------------|----------|--------------------|------|
| Tekanan <i>Collapse</i> Elastis       | $P_{el}$ | $2.25 \times 10^6$ | Pa   |
| Tekanan <i>Collapse</i> Plastis       | $P_p$    | $1.47 \times 10^7$ | Pa   |
| Ovalisasi                             | $f_o$    | 0.163              | Pa   |
| Karakteristik Tekanan <i>Collapse</i> | $P_c$    | $3.01 \times 10^6$ | Pa   |

Setelah menemukan hasil dari karakteristik tekanan *collapse*, maka sesuai dengan Persamaan (2.44) yang juga tertera pada DNV OS F101 2012 : *Submarine Pipeline System*, harus dilakukan pengecekan sesuai dengan kriteria yang ada pada *standard code*. Maka, hasil dari pengecekan tersebut dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 4.14 Hasil Pengecekan terhadap *System Collapse*

|                 |        |  |
|-----------------|--------|--|
| $P_e - P_{min}$ | $\leq$ | $\frac{P_c}{\gamma_m \cdot \gamma_{SC}}$ |
| 620000          | $\leq$ | 2516722.4                                |
| <b>memenuhi</b> |        |  |

dimana  $\gamma_m$  merupakan *material resistance factor* yang nilainya dapat dilihat pada *Table 5-2 DNV OS F101 2012*, sedangkan  $\gamma_{SC}$  merupakan *safety class resistance factor* yang nilainya dapat dilihat pada *Table 5-3 DNV OS F101 2012*. Pada kasus tugas akhir ini,  $\gamma_m$  bernilai 1.15 dan  $\gamma_{SC}$  bernilai 1.04 dengan pembuktian pada dua tabel di bawah ini :

Tabel 4.15 *Material Resistance Factor*

| <b>Table 5-2 Material resistance factor, <math>\gamma_m</math></b> |                    |            |
|--|--------------------|------------|
| <i>Limit state category</i> <sup>1)</sup>                          | <i>SLS/ULS/ALS</i> | <i>FLS</i> |
| $\gamma_m$   | 1.15               | 1.00       |
| 1) The limit states (SLS, ULS, ALS and FLS) are defined in D.      |                    |            |

Tabel 4.16 *Safety Class Resistance Factor*

| <b>Table 5-3 Safety class resistance factors, <math>\gamma_{SC}</math></b> |                        |               |                     |
|--|------------------------|---------------|---------------------|
|  | $\gamma_{SC}$          |               |                     |
| <i>Safety class</i>  | <i>Low</i>             | <i>Medium</i> | <i>High</i>         |
| Pressure containment <sup>1)</sup>   | 1.046 <sup>2),3)</sup> | 1.138         | 1.308 <sup>4)</sup> |
| Other  | 1.04                   | 1.14          | 1.26                |

#### 4.2.3.2 Perhitungan *Pressure Containment*

Fluida yang mengalir di dalam pipa memiliki tekanan internal yang mengharuskan pipa kuat untuk menahan tekanan tersebut. Besar tekanan yang diakibatkan oleh fluida yang mengalir dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.47). Dalam persamaan tersebut, terdapat variabel  $f_{cb}$  dimana untuk mendapatkan nilai dari variabel tersebut adalah dengan memilih nilai yang paling kecil antara *Characteristic Yield Stress* ( $f_y$ ) dengan *Characteristic Ultimate Strength* ( $f_u$ ) yang dibagi 1.15. Setelah dilakukan perhitungan, maka didapatkan nilai  $f_y$  lebih kecil dari  $f_u / 1.15$  sehingga nilai dari variabel  $f_{cb}$  adalah sama dengan  $f_y$ . Dengan didapatkannya nilai  $f_{cb}$ , maka nilai dari *pressure containment* pada Persamaan (2.47) adalah sebesar  $1.73 \times 10^7$  Pa.

Langkah selanjutnya adalah melakukan pengecekan pada kekuatan pipa terhadap *pressure containment* yang dinyatakan dalam Persamaan (2.45). Dalam persamaan tersebut, terdapat variabel tekanan lokal insidental ( $P_{li}$ ) yang memiliki nilai sebesar  $8.75 \times 10^6$  Pa, dimana hasil tersebut merupakan hasil perhitungan dari Persamaan (2.46). Maka, hasil dari pengecekan dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 4.17 Hasil Pengecekan terhadap *Pressure Containment*

| $P_{li} - P_e$ | $\leq$ | $\frac{P_b(t)}{\gamma_{sc} \cdot \gamma_m}$ |
|----------------|--------|---|
| 8133380        | $\leq$ | 14465288                                    |
| memenuhi       |        |   |

#### 4.2.3.3 Perhitungan *Propagation Buckling*

Jika tekanan eksternal lebih besar dari tekanan penahan *propagation buckling*, maka penampang pipa akan mengalami deformasi bentuk. Dengan menggunakan Persamaan (2.48), nilai dari tekanan propagasi adalah sebesar  $5.73 \times 10^5$  Pa. Selanjutnya dilakukan pengecekan dengan menggunakan Persamaan (2.49) dengan hasil sebagai berikut :

Tabel 4.18 Hasil Pengecekan terhadap *Propagation Buckling*

|                       |        |   |
|-----------------------|--------|---|
| $P_e - P_{min}$       | $\leq$ | $\frac{P_{pr}}{\gamma_m \cdot \gamma_{sc}}$ |
| 620000                | $\leq$ | 479559.04                                   |
| <b>tidak memenuhi</b> |        |   |

#### 4.2.3.4 Perhitungan *Combined Loading Criteria*

Kriteria ini merupakan syarat kekuatan pipa terhadap semua gaya dan tegangan yang terjadi pada struktur pipa bawah laut. Kriteria ini dicek dalam dua kondisi yakni *internal overpressure* pada Persamaan (2.50) dan *external overpressure* pada Persamaan (2.57). Dalam kedua persamaan tersebut, terdapat variabel-variabel yang harus diketahui terlebih dahulu nilainya yaitu mulai dari Persamaan (2.51) sampai dengan Persamaan (2.56). Setelah dilakukan perhitungan, nilai dari variabel-variabel tersebut dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 4.19 Hasil Perhitungan Variabel-Variabel pada *Combined Loading Criteria*

| <i>Description</i>                                    | <i>Symbol</i> | <i>Value</i>       | <i>Unit</i> |
|---|---------------|--------------------|-------------|
| <i>Flow Stress Parameter</i>                          | $\alpha_c$    | 1.003              |             |
| <i>Combined Loading Criteria Factor</i>               | $\beta$       | 0.015              |             |
| Tahanan Momen Plastis                                 | $M_p(t_2)$    | $5.78 \times 10^6$ | Nm          |
| Karakteristik Tahanan Gaya Aksial Plastis             | $S_p(t_2)$    | $1.98 \times 10^7$ | N           |
| Faktor Tekanan untuk <i>Combined Loading Criteria</i> | $\alpha_p$    | 0.99               |             |

Untuk perhitungan faktor tekanan pada *combined loading criteria* di atas adalah dengan menggunakan Persamaan (2.55), dikarenakan nilai dari

$$\frac{P_i - P_e}{P_b} = 0.38265 \text{ dan nilai tersebut kurang dari } \frac{2}{3}.$$

Setelah mengetahui nilai dari variabel-variabel di atas, maka dilakukan pengecekan sesuai dengan Persamaan (2.50) dan Persamaan (2.57). Hasil dari pengecekan tersebut dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 4.20 Hasil Pengecekan terhadap *Combined Loading Criteria*  
Kondisi *Internal Overpressure*

|   |        |   |
|---|--------|---|
| $\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{ M_{Sd} }{\alpha_c \cdot M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot S_{Sd}(p_i)}{\alpha_c \cdot S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left( \alpha_p \cdot \frac{p_i - p_e}{\alpha_c \cdot p_b(t_2)} \right)^2 \leq 1$ |        |   |
| 0.25378   | $\leq$ | 1 |
| <b>memenuhi</b>   |        |   |

Tabel 4.21 Hasil Pengecekan terhadap *Combined Loading Criteria*  
Kondisi *External Overpressure*

|  |        |   |
|--|--------|---|
| $\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{ M_{Sd} }{\alpha_c \cdot M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot S_{Sd}}{\alpha_c \cdot S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left( \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{p_e - p_{\min}}{p_c(t_2)} \right)^2 \leq 1$ |        |   |
| 0.17315  | $\leq$ | 1 |
| <b>memenuhi</b>  |        |   |

#### 4.2.4 Perhitungan Analisis Batas Tegangan *Ultimate*

Menurut ABS 2005, struktur akan mengalami kegagalan pada saat tegangan yang terjadi pada struktur melebihi  $0,8 \times UTS$ . Dalam tugas akhir ini, struktur dikatakan mengalami kegagalan jika tegangan yang terjadi melebihi 428 M Pa. Dalam subbab batasan masalah, telah dijelaskan bahwa tegangan yang diperhitungkan dalam perhitungan *incremental load* hanya *equivalent stress* saja. Analisis kegagalan *ultimate* pada *equivalent stress* tersebut dimaksudkan untuk mencari pada tahap peningkatan ke berapakah tegangan maksimum akan terjadi dengan menaikkan kecepatan arus efektifnya. Kenaikan kecepatan arus dan gelombang

efektif serta *equivalent stress* yang dihasilkan dari proses *incremental* dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 4.22 Tegangan yang Dihasilkan pada *Equivalent Stress* dengan Metode *Incremental Load*

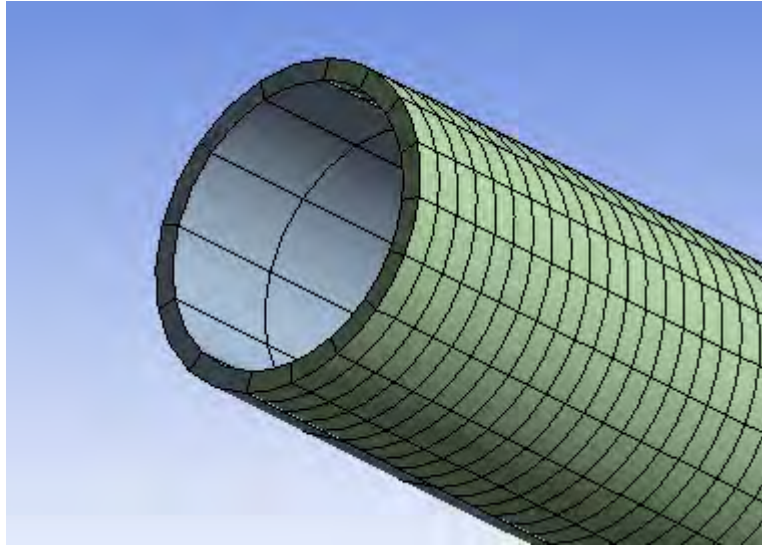
| <b><i>Increment ke-</i></b> | <b><i>U (m/s)</i></b> | <b><i>F<sub>D</sub> (N)</i></b> | <b><i>q (N/m)</i></b> | <b><i>σ<sub>B</sub> (Pa)</i></b> | <b><i>σ<sub>E</sub> (Pa)</i></b> | <b><i>Ket</i></b> |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------|
| 1                           | 0.176                 | 146.72                          | 3401.528              | 122616785                        | 242002534.4                      | aman              |
| 1.5                         | 0.264                 | 330.13                          | 3420.253              | 123291780                        | 242546039.9                      | aman              |
| 3                           | 0.528                 | 1320.5                          | 3681.089              | 132694261                        | 250183506.4                      | aman              |
| 4.5                         | 0.792                 | 2971.1                          | 4582.237              | 165178457                        | 277405417.5                      | aman              |
| 6                           | 1.056                 | 5282                            | 6369.976              | 229622089                        | 334203675.8                      | aman              |
| 7.5                         | 1.32                  | 8253.2                          | 9024.641              | 325316267                        | 422611271.5                      | aman              |
| 7.58                        | 1.334                 | 8430.2                          | 9188.910              | 331237798                        | 428184853.7                      | tidak aman        |

Dari hasil perhitungan pada tabel di atas, dapat dilihat bahwa kegagalan *ultimate* terjadi saat kecepatan arus dan gelombang efektif dinaikkan hingga 7.58 kali dari kecepatan arus awal, yaitu dengan tegangan maksimum yang terjadi sebesar 428,2 MPa. Dengan demikian, kegagalan pada pipa bawah laut yang dianalisa pada *equivalent stress*-nya terjadi dengan menaikkan kecepatan arus hingga 1.334 m/s.

### 4.3 Pemodelan dengan *Software* Ansys

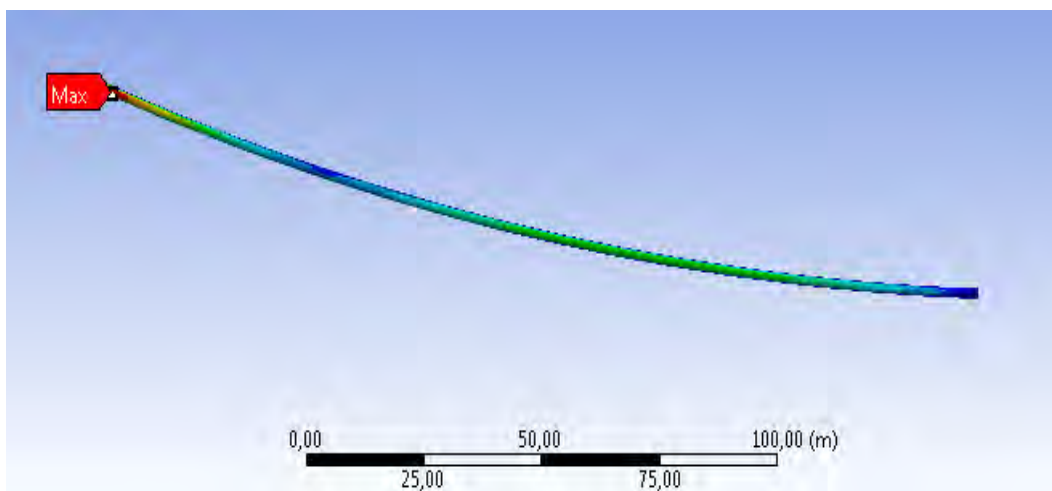
Setelah melakukan analisa secara perhitungan untuk pengecekan terhadap *Ultimate Limit State* pada pipa bawah laut, maka langkah terakhir dalam bab ini adalah melakukan pemodelan dengan menggunakan *software* untuk menggambarkan hasil analisis kondisi pipa bawah laut secara visual. *Software* yang dipilih dan digunakan penulis dalam melakukan pemodelan tersebut adalah ANSYS 15.0

Pemodelan pada tugas akhir ini hanya dilakukan pada hasil analisis perhitungan *incremental load* yang menganalisa tegangan maksimum yang terjadi pada pipa bawah laut ketika suatu beban dinaikkan secara bertahap hingga melebihi batas *ultimate*-nya yaitu 428 MPa. Berikut adalah hasil pemodelan struktur pipa bawah laut pada Ansys :

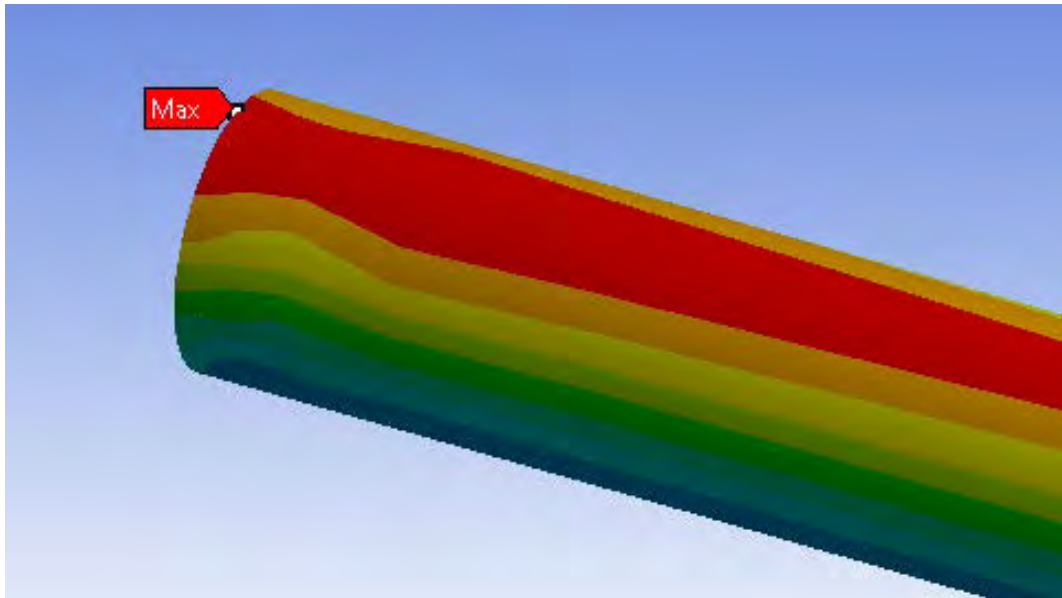


Gambar 4.6 Hasil pemodelan dengan *solid elements* disertai *meshing*

Gambar di atas adalah hasil pemodelan awal pada struktur pipa bawah laut dalam bentuk tiga dimensi yang meliputi tiga sumbu koordinat ( $x$ ,  $y$ , dan  $z$ ) dengan menggunakan jenis *solid elements* yang sudah di-*meshing* dan memiliki ketebalan. Langkah selanjutnya adalah melakukan pemodelan berdasarkan hasil *running-an* dari Ansys dengan *input-an* momen, beban hidrodinamik, *boundary condition*, dan beban total struktur pipa bawah laut. Dari hasil *running-an* tersebut, maka didapatkan *output-an* dalam bentuk *equivalent stress* yang melebihi batas *ultimate* struktur yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini :

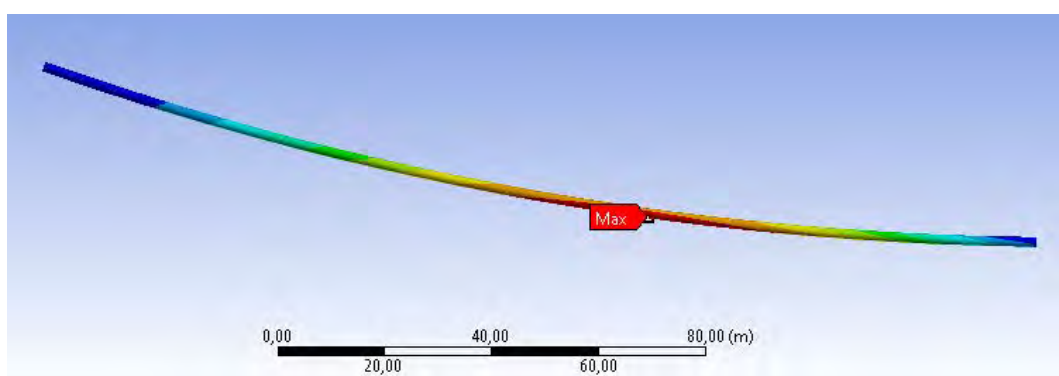


Gambar 4.7 Hasil pemodelan *equivalent stress* pada saat struktur mengalami beban *ultimate*



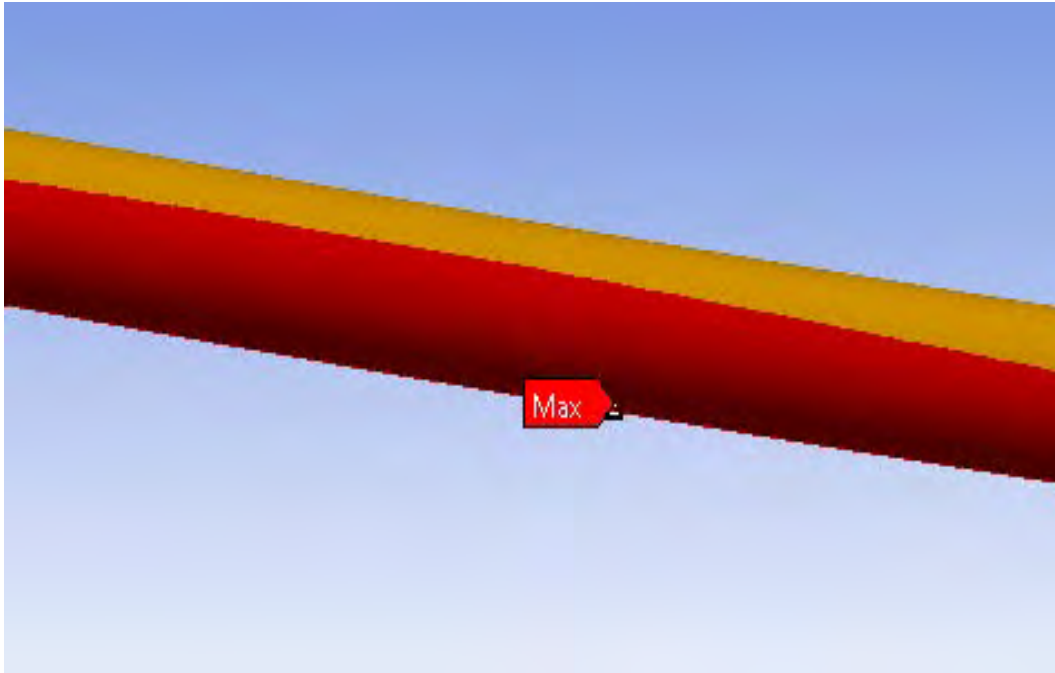
Gambar 4.8 Titik lokasi saat terjadinya *equivalent stress* maksimum pada saat struktur mengalami beban *ultimate*

Setelah dilakukan pemodelan pada struktur pipa bawah laut terhadap tegangan maksimum yang terjadi, berikutnya adalah melakukan pemodelan pada struktur pipa bawah laut terhadap *displacement* yang terjadi. Dengan *input-an* yang sama, maka didapatkan *output-an* dalam bentuk *displacement/deformation* maksimum yang melebihi batas *ultimate* struktur pipa bawah laut yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini :



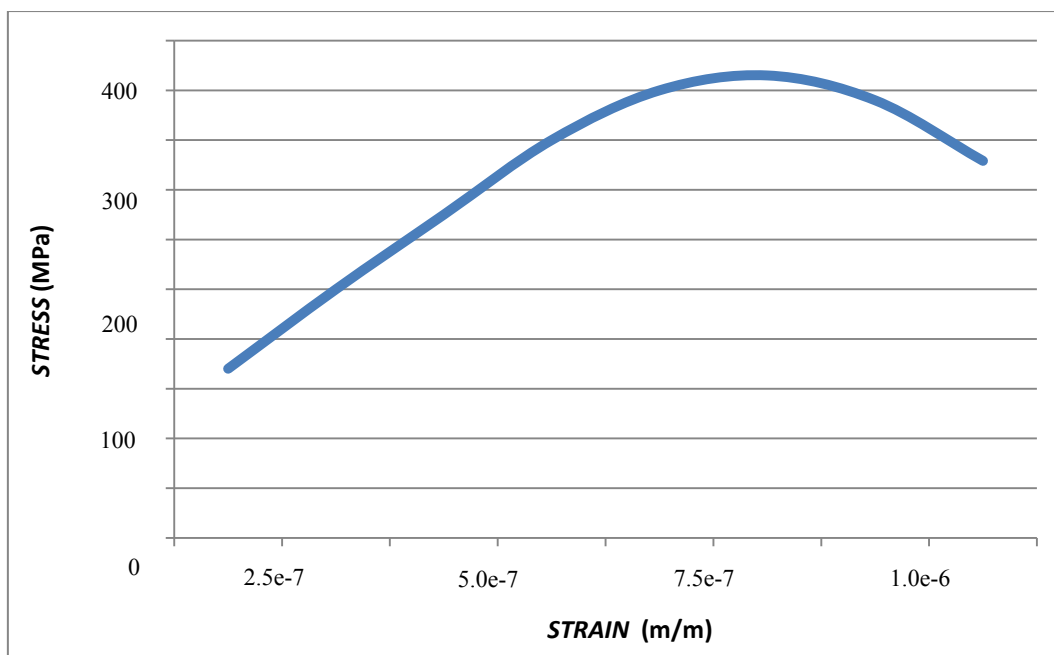
Gambar 4.9 Hasil pemodelan *displacement* pada saat struktur mengalami beban *ultimate*



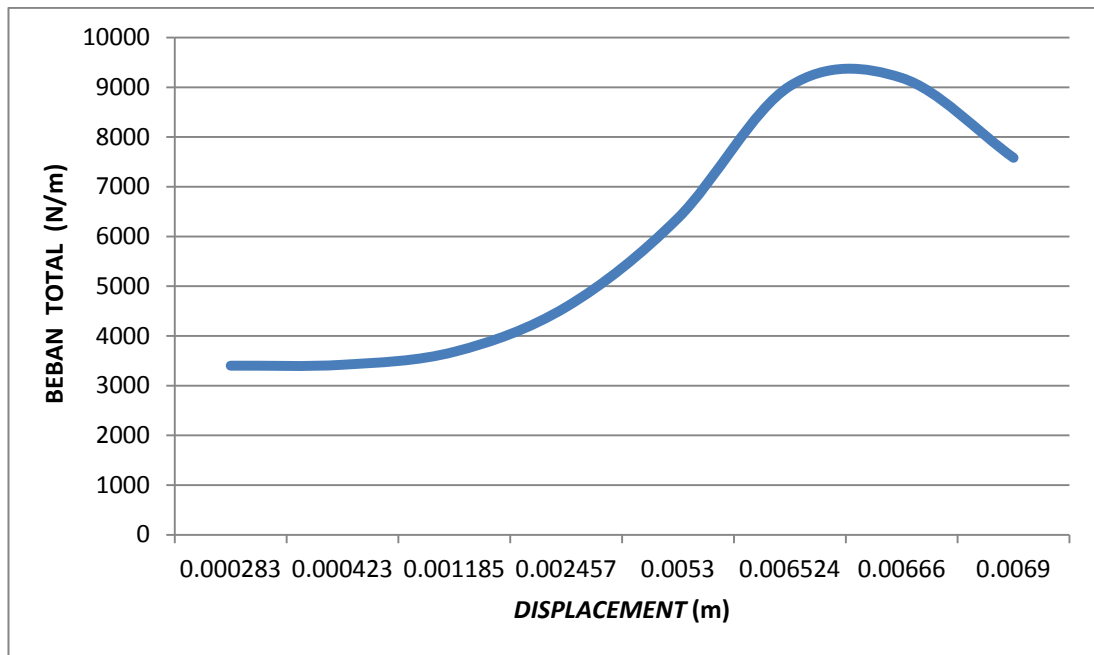


Gambar 4.10 Titik lokasi saat terjadinya *displacement* maksimum pada saat struktur mengalami beban *ultimate*

Dari hasil perhitungan dan pemodelan, untuk mempermudah dalam membaca kejadian yang terjadi pada struktur pipa bawah laut yang dianalisa, berikut dua grafik hubungan yang dihasilkan dari hasil analisa pada tugas akhir ini :



Gambar 4.11 Grafik hubungan antara *stress* dan *strain*



Gambar 4.12 Grafik hubungan antara beban total dan *displacement*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari berbagai hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan pada Bab IV, maka didapatkan beberapa kesimpulan yang bisa ditarik sekaligus menjawab semua rumusan masalah pada Bab I. Kesimpulan-kesimpulan yang didapatkan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Hasil analisis *free span* statik pada pipa bawah laut menunjukkan bahwa panjang *free span* yang diizinkan adalah 194,89 m dimana hasil tersebut hampir sama dengan panjang aktual pipa yang dianalisa yakni 195 m.
2. Tegangan-tegangan yang terjadi pada pipa bawah laut yang dianalisa telah memenuhi syarat kriteria sesuai dengan konsep *Allowable Stress Design (ASD)* yang mengacu pada DNV OS F101 : *Submarine Pipeline System* 2012.
3. Dari hasil analisis kriteria *global buckling* pada pipa bawah laut menunjukkan bahwa salah satu kriteria yaitu *propagation buckling* tidak memenuhi kriteria sesuai dengan acuan DNV OS F101 : *Submarine Pipeline System* 2012.
4. Sesuai dengan ABS : *Commentary on the Guide-Buckling and Ultimate Strength Assesment for Offshore Structures* 2005, suatu struktur akan mengalami kegagalan pada saat tegangan yang terjadi melebihi dari  $0,8 \times \text{Ultimate Tensile Strength (UTS)}$  dimana batas tegangan *ultimate* pada tugas akhir ini adalah sebesar 428 MPa. Dari hasil perhitungan dengan menggunakan metode *incremental load*, dapat dikatakan bahwa kegagalan *ultimate* terjadi saat kecepatan arus dan gelombang efektif dinaikkan hingga 7.58 kali dari kecepatan arus awal, dengan menghasilkan tegangan maksimum yang terjadi sebesar 428,2 MPa. Dengan demikian, kegagalan pada pipa bawah laut yang dianalisa pada *equivalent stress*-nya terjadi dengan menaikkan kecepatan arus hingga 1.334 m/s.

#### **5.2 Saran**

Saran-saran yang mampu diberikan penulis bagi yang ingin melanjutkan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Dibutuhkan perhitungan untuk analisis *buckle arrestor* sebagai bentuk penanggulangan dari terjadinya *propagation buckling* pada tugas akhir ini agar pipa tidak sampai mengalami kegagalan.
2. Diperlukan analisis lebih lanjut terhadap *Fatigue Limit State (FLS)* yang mana analisis ini merupakan analisis pipa bawah laut secara dinamis yang dipengaruhi oleh fenomena getaran yang muncul akibat adanya gaya hidrodinamika yang mengenai struktur pipa bawah laut (*VIV*).

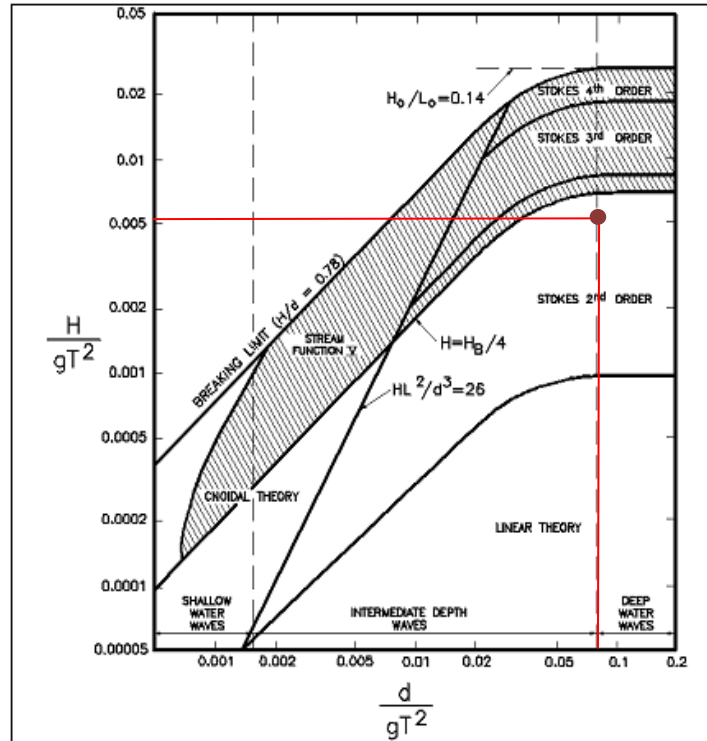
**LAMPIRAN A**  
**PERHITUNGAN TEORI**  
**GELOMBANG**

## PERHITUNGAN TEORI GELOMBANG

INPUT DATA UNTUK MENENTUKAN TEORI GELOMBANG :

$$\begin{array}{ll} H = & 4.98 \text{ m} \\ T = & 9.45 \text{ s} \end{array} \qquad \begin{array}{ll} g = & 9.8 \text{ m/s}^2 \\ d = & 62 \text{ m} \end{array}$$

Grafik *Region of Validity of Wave Theories*



$$\frac{H}{gT^2} = \frac{4.98}{(9.8)(9.45)^2} = 0.00569$$

$$\frac{d}{gT^2} = \frac{52}{(9.8)(9.45)^2} = 0.070844$$

>> berdasarkan grafik diatas, maka menggunakan Teori Gelombang **Stoke Orde Dua**

Persamaan yang digunakan pada teori stoke ini dapat diketahui dari persamaan berikut (Mouselli, 1981):

Kecepatan horizontal partikel:

$$U = \frac{\pi H \cosh ks}{T \sinh kd} \cos \theta + \frac{3}{4} \left( \frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi H \cosh 2ks}{T \sinh^4 kd} \cos 2\theta$$

dengan :

$$\begin{aligned}
 \pi &= 3.14 & k &= 2\pi / L = 0.045411 \\
 H &= 4.98 \text{ m} & s &= y + d = 0.4664 \text{ m} \\
 T &= 9.45 \text{ s} & d &= 62 \text{ m} \\
 L &= 138.294 \text{ m} & \theta &= (kx - \omega t) \text{ , asumsi } x \text{ dan } t = 0 \\
 y &= -61.5336 \text{ m} & & \text{menghasilkan nilai cos maksimal (1)} \\
 D &= 0.9328 \text{ m} & & \text{maka , } \theta = 45
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{(3.14)(4.98)}{9.45} \cdot \frac{\cosh(0.045411 \times 0.4664)}{\sinh(0.045411 \times 62)} \cdot \cos(0) + \\
 &\quad \frac{(3)(3.14)(4.98)}{(4)(138.294)} \cdot \frac{(3.14)(4.98)}{9.45} \cdot \frac{\cosh^2(0.045411 \times 0.4664)}{\sinh^4(0.045411 \times 62)} \cdot \cos^2(0) \\
 &= \left[ 1.65473 \right] \left[ \frac{1.00022}{8.32042} \right] \left[ 0.707106781 \right] + \left[ 0.084804 \right] \left[ 1.65473 \right] \\
 &\quad \left[ \frac{1.0009}{4792.7} \right] \left[ -0.44807 \right]
 \end{aligned}$$

$$U = 0.14066 + -1.31312\text{E-}05$$

$$U = 0.14064 \text{ m/s}$$

### Menghitung Kecepatan Partikel Gelombang Efektif ( $U_w$ )

$$U_w = 0.778 U_o^2 \left( \frac{D}{y_o} \right)^{0.286}$$

dengan:

$$U_o = \text{kecepatan horizontal partikel air yang diketahui pada } y_o \text{ (m/s)}$$

$$\frac{U}{U_o} = \left( \frac{y}{y_o} \right)^{1/7}$$

$$D = \text{diameter luar pipa (m)}$$

$$y = \text{kedalaman titik yang ditinjau dari MSL (m)}$$

$$y_o = \text{ketinggian orbit partikel dari dasar laut (m)}$$

maka,

$$U_o = -0.014924 \text{ m/s}$$

$$U_w = 0.167 \text{ m/s}$$



### Menghitung Kecepatan Partikel Arus ( $U_D$ )

$$U_D = U_r \cdot \frac{\left(1 + \frac{Z_o}{D}\right) \cdot \left(\ln\left(\frac{D}{Z_o} + 1\right) - 1\right)}{\ln\left(\frac{Z_r}{Z_o} + 1\right)} \cdot \sin(\theta_{curr})$$

dengan :

$$\begin{aligned} U_r &= 0.21 \text{ m/s} \\ Z_o &= 0.00000521 \text{ m} \\ Z_r &= 1 \text{ m} \end{aligned}$$

$$U_D = 0.21 \cdot \frac{\left(1 + \frac{0.00000521}{0.9328}\right) \cdot \left(\ln\left(\frac{0.9328}{0.00000521} + 1\right) - 1\right)}{\ln\left(\frac{1}{0.00000521} + 1\right)} \cdot \sin(0)$$

$$= \frac{0.21 \times 1 \times (\ln(179041.31) - 1)}{\ln(191939.58)} \cdot 0.707107$$

$$= \frac{0.21 \times 11.09}{12.165} \cdot 0.707106781$$

$$= \frac{2.329}{12.165} \cdot 0.707106781$$

$$U_D = 0.135376218 \text{ m/s}$$

### Menghitung Kecepatan Partikel Arus Efektif ( $U_c$ )

$$U_c = 0.778 U_o^2 \left(\frac{D}{y_o}\right)^{0.286}$$

$$U_c = 0.014258188 \text{ m/s}$$

### Menghitung kecepatan efektif yang mengenai pipa ( $U_e$ )

$$U_e = U_w + U_c = \sqrt{U_w^2 + U_c^2 + 2 \cdot U_w \cdot U_c \cdot \cos \theta}$$

$$= \sqrt{0.027889^2 + 0.000203296^2 + 2 \cdot 0.027889 \cdot 0.000203296 \cdot \cos \theta}$$

$$U_e = 0.174911414 \text{ m/s}$$

Dengan perhitungan yang sama seperti di atas, maka dengan sudut ( $\theta$ ) yang berbeda akan memperoleh nilai sebagai berikut :

| <b><i>Description</i></b>   | <b>Sudut 0°</b> | <b>Sudut 45°</b> | <b>Sudut 90</b> |
|-----------------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| <b><i>U</i></b>             | 0.199           | 0.141            | 0               |
| <b><i>U<sub>o</sub></i></b> | -0.021          | -0.015           | 0               |
| <b><i>U<sub>w</sub></i></b> | 0.176           | 0.167            | 0               |
| <b><i>U<sub>D</sub></i></b> | 0               | 0.135            | 0.191           |
| <b><i>U<sub>c</sub></i></b> | 0               | 0.014            | 0.029           |
| <b><i>U<sub>e</sub></i></b> | 0               | 0.175            | 0.029           |
| <b><i>R<sub>e</sub></i></b> | 156355.076      | 155387.968       | 25333..40615    |
| <b><i>C<sub>D</sub></i></b> | 1.01            | 1.01             | 1.45            |
| <b><i>C<sub>M</sub></i></b> | 2               | 2                | 2               |
| <b><i>C<sub>L</sub></i></b> | 0.89            | 0.89             | 1.15            |
| <b><i>F<sub>D</sub></i></b> | 146.55          | 145.21           | 5.51            |
| <b><i>F<sub>I</sub></i></b> | 0               | 109.82           | 2.47            |
| <b><i>F<sub>L</sub></i></b> | 128.89          | 127.59           | 4.38            |

**LAMPIRAN B**

**PERHITUNGAN KOEFISIEN**  
**HIDRODINAMIK**

### Menghitung $F_D$ , $F_I$ , dan $F_L$

\* Sebelum itu kita harus menghitung reynold number terlebih dahulu

$$Re = \frac{U_c D}{\nu} = 155387.9684$$

dengan diketahuinya nilai  $Re$ , maka :

$$\begin{aligned} C_D &= 1.012040105 \\ C_L &= 0.889224063 \\ C_M &= 2 \end{aligned}$$

sehingga :

#### a. Drag Force

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D D U_c^2$$

$$F_D = 145.2062929 \text{ N}$$

#### b. Inertia Force

$$F_i = \rho C_m (\pi D^2/4) (du/dt)$$

dengan :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{2\pi^2 H \cosh ks}{T \sinh kd} \sin \theta + \frac{3\pi^2 H}{T^2} \left( \frac{\pi H}{L} \right) \frac{\cosh 2ks}{\sinh^4 kd} \sin 2\theta \\ &= \left[ 10.39171 \right] \left[ 0.120213264 \right] \left[ 0.850903525 \right] + \\ &\quad \left[ 1.649477 \right] \left[ 0.113072151 \right] \left[ 0.000208838 \right] \left[ 0.8939967 \right] \\ &= 1.062966 + 3.48215E-05 \\ &= 1.063001 \end{aligned}$$

sehingga

$$F_I = 109.817833 \text{ N}$$

#### c. Lift Force

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L D U_c^2$$

$$F_L = 127.5848 \text{ N}$$

**LAMPIRAN C**  
**PERHITUNGAN PANJANG**  
***SPAN* STATIK**

## PERHITUNGAN PANJANG SPAN STATIK

### DATA INPUT :

| DESCRIPTION                         | SYMBOL    | VALUE      | UNIT              |
|-------------------------------------|-----------|------------|-------------------|
| Specified Minimum Yield Stress      | SMYS      | 450000000  | Pa                |
| Tekanan Internal                    | $P_i$     | 7240000    | Pa                |
| Diameter Luar                       | OD        | 0.8128     | m                 |
| Diameter Dalam                      | ID        | 0.781      | m                 |
| Tebal Pipa                          | WT        | 0.0159     | m                 |
| Kecepatan Partikel Arus dan Gel Air | $U_e$     | 0.175      | m/s               |
| Densitas Air Laut                   | $\rho$    | 10055.25   | N/m <sup>3</sup>  |
| Viskositas Air Laut                 | $\nu$     | 0.00000105 | m <sup>2</sup> /s |
| Tekanan Eksternal                   | $P_e$     | 620000     | Pa                |
| Diameter                            | $D$       | 0.9328     | m                 |
| Luas Penampang Pipa Bagian Dalam    | $A_i$     | 0.48       | m <sup>2</sup>    |
| Luas Penampang Pipa                 | $A_s$     | 0.04       | m <sup>2</sup>    |
| Luas Penampang Pipa Bagian Luar     | $A_e$     | 0.52       | m <sup>2</sup>    |
| Beban Pipa Terendam                 | $W_{sub}$ | 3391.84    | N/m               |
| Momen Inersia                       | $I$       | 0.003161   | m <sup>4</sup>    |
| Gaya Aksial Afektif                 | $S_{eff}$ | -517669    | N                 |

#### a) Beban Hidrodinamik ( $F_H$ )

$$F_H = F_D + F_I$$

Nilai koefisien *drag* ( $C_D$ ) di atas didapat dengan terlebih dahulu mencari nilai *Reynolds Number*. Adapun rumus dari *Reynolds Number* ( $R_e$ ) adalah sebagai berikut

$$R_e = \frac{U \cdot D}{\nu} = 155466.6667$$

$$R_e = 2.04 \times 10^5$$

Setelah mendapat nilai  $R_e$ , lalu disesuaikan dengan tabel *Recommended Hydrodynamics Coefficient* (Mouselli, 1981), sehingga didapatkan nilai  $C_D = 1.01$

$$C_M = 2$$

$$\text{maka, } F_H = 256.368 \text{ N/m}$$

#### b) Beban Terdistribusi Merata ( $W$ )

$$W = \sqrt{F_{IL}^2 + W_{sub}^2}$$

$$\text{maka, nilai } W = 3401.51483 \text{ N/m}$$

#### c) Tegangan Longitudinal Akibat Beda Tekanan ( $\sigma_i$ )

$$\sigma_i = \frac{S_{eff} + P_i \cdot A_i - P_e \cdot A_e}{A_s}$$

$$\text{maka } \sigma_i = 65878275 \text{ N/m}^2$$

**d) Momen Lentur ( $M$ )**

Nilai momen lentur didapatkan dari persamaan batas tegangan dimana :

$$\sigma_b + \sigma_i \leq 0,8 SMYS$$

dimana :

$$\sigma_b = \frac{M . D}{2 . I}$$

maka :

$$\frac{M \times 0.9328}{2 \times 0.003161} + 65878275 \leq 360000000$$

$$M \leq \frac{1859437.5}{0.9328}$$

$$M \leq 1993393.6 \text{ Nm}$$

**e) Panjang *Span* Statik ( $L$ )**

$$L = \sqrt{\frac{8M}{W}}$$

$$L = 194.89 \text{ m}$$

# **LAMPIRAN D**

## **PERHITUNGAN TEGANGAN**



## PERHITUNGAN TEGANGAN

### DATA INPUT :

| DESCRIPTION                        | SYMBOL     | VALUE    | UNIT            |
|------------------------------------|------------|----------|-----------------|
| External Pressure                  | $P_e$      | 620000   | Pa              |
| Internal Pressure                  | $P_i$      | 7240000  | Pa              |
| Outside Diameter                   | $OD$       | 0.8128   | m               |
| Wall Thickness                     | $WT$       | 0.0159   | m               |
| Berat Pipa dalam Air               | $W_{sub}$  | 3391.84  | N/m             |
| Drag Force                         | $F_D$      | 146.55   | N               |
| Inertia Force                      | $F_I$      | 109.82   | N               |
| Tebal dinding (coating+concrete)   | $D_{tcc}$  | 0.06     | m               |
| Panjang Span Statis                | $L_{eff}$  | 194.89   | m               |
| Momen Inersia                      | $I$        | 0.003161 | m <sup>4</sup>  |
| Modulus Elastisitas Baja           | $E$        | 2.07E+11 | Pa              |
| Max. Operating Temperature         | $T_{max}$  | 35       | °C              |
| Installation Temperature           | $T_{min}$  | 26       | °C              |
| Koefisien Ekspansi Thermal         | $\alpha_T$ | 0.000012 | C <sup>-1</sup> |
| Poisson Ratio                      | $\nu$      | 0.3      |                 |
| Konstanta Kondisi Batas Perletakan | $C$        | 10       |                 |

#### a) Hoop Stress ( $\sigma_H$ )

$$\sigma_H = \frac{P \cdot r}{t} = \frac{|P_e - P_i| \cdot (OD - WT)}{2 \cdot t}$$

$$= \frac{5275478}{0.0318}$$

$$= 165895534.6 \text{ Pa}$$

#### b) Tegangan End Cap Effect ( $\sigma_{ep}$ )

$$\sigma_{ep} = \frac{\sigma_H}{2}$$

$$= 82947767.3 \text{ Pa}$$

#### c) Bending Stress ( $\sigma_B$ )

\* Beban kombinasi dari berat pipa dalam air dan gaya hidrodinamik horizontal ( $q$ )

$$q = \sqrt{W_{sub}^2 + (F_D + F_I)^2}$$

$$= 3401.51498 \text{ N/m}$$

\* Momen Tekuk Statik Maksimum ( $M_B$ )

$$M_B = \frac{q \cdot L_{eff}^2}{C}$$

$$= 12919672.33 \text{ Nm}$$

maka,

$$\sigma_B = \frac{M_B \cdot D_{tcc}}{2 \cdot I}$$

$$= \frac{775180.3398}{0.006322}$$

$$= 122616314.4 \quad \text{Pa}$$

**d) Thermal Stress ( $\sigma_T$ )**

$$\sigma_T = E \cdot \alpha_T \cdot \Delta T$$

$$= 22356000 \quad \text{Pa}$$

**e) Poisson Stress ( $\sigma_P$ )**

$$\sigma_P = \nu \cdot \sigma_H$$

$$= 49768660.38 \quad \text{Pa}$$

**f) Longitudinal Stress ( $\sigma_L$ )**

$$\sigma_L = \sigma_B + \sigma_{ep} + \sigma_T + \sigma_P$$

$$= 277688742.1 \quad \text{Pa}$$

**g) Equivalent Stress ( $\sigma_E$ )**

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_H^2 + \sigma_L^2 - \sigma_H \cdot \sigma_L + 3 \cdot \tau_x^2}$$

$$= 242002156.1 \quad \text{Pa}$$

**LAMPIRAN E**  
**PERHITUNGAN**  
**PENGECEKAN *ULS***

# PERHITUNGAN PENGECEKAN ULS

## DATA INPUT :

### Kriteria Allowable Stress Design (ASD)

| DESCRIPTION                                | SYMBOL       | VALUE     | UNIT |
|--|--------------|-----------|------|
| Usage Factor                               | $\eta$       | 1         |      |
| Derating Strength Value due to Temperature | $f_{y,temp}$ | 0         | Pa   |
| Specified Minimum Yield Stress             | SMYS         | 450000000 | Pa   |
| Equivalent Stress Usage Factor             | $n$          | 1         |      |
| Characteristic Yield Stress                | $f_y$        | 432000000 | Pa   |

#### a) Hoop Stress ( $\sigma_H$ )

$$\sigma_H \leq \eta \cdot (SMYS - f_{y,temp})$$

$$165895534.6 \leq 450000000$$

memenuhi

#### b) Total Longitudinal Stress ( $\sigma_L$ )

$$\sigma_L \leq n \cdot f_y$$

$$277688742.1 \leq 432000000$$

memenuhi

#### c) Equivalent Stress / Von Mises Stress ( $\sigma_E$ )

$$\sigma_E \leq n \cdot f_y$$

$$242002156.1 \leq 432000000$$

memenuhi

### Kriteria Collapse, Buckling, and Combined Loading

| DESCRIPTION                          | SYMBOL         | VALUE     | UNIT              |
|--------------------------------------|----------------|-----------|-------------------|
| Modulus Elastisitas Baja             | $E$            | 2.07E+11  | Pa                |
| Diameter                             | $D$            | 0.9328    | m                 |
| Poisson Ratio                        | $\nu$          | 0.3       |                   |
| Faktor Fabrikasi                     | $\alpha_{fab}$ | 1         |                   |
| Diameter Pipa Terkecil yang Diukur   | $D_{min}$      | 0.781     | m                 |
| Diameter Pipa Terbesar yang Diukur   | $D_{max}$      | 0.9328    | m                 |
| External Pressure                    | $P_e$          | 620000    | Pa                |
| Wall Thickness                       | $WT$           | 0.0159    | m                 |
| Material Resistance Factor           | $\gamma_m$     | 1.15      |                   |
| Safety Class Resistance Factor       | $\gamma_{SC}$  | 1.04      |                   |
| Pressure Design                      | $P_d$          | 7930000   | Pa                |
| Incidental to Design Pressure Ratios | $\gamma_{inc}$ | 1.1       |                   |
| Contents Density                     | $\rho_{cont}$  | 50        | kg/m <sup>3</sup> |
| Percepatan Gravitasi                 | $g$            | 9.8       | m/s <sup>2</sup>  |
| Kedalaman pipa dari permukaan laut   | $h$            | 62        | m                 |
| Characteristic Ultimate Strength     | $f_u$          | 513600000 | Pa                |

|                            |          |         |    |
|----------------------------|----------|---------|----|
| Momen Bending Desain       | $M_{sd}$ | 1623400 | Nm |
| Gaya Aksial Afektif Desain | $S_{sd}$ | 127000  | Nm |

a) *System Collapse* ( $P_c$ )

$$(P_c - P_{el}) \cdot (P_c^2 - P_p^2) = P_c \cdot P_{el} \cdot P_p \cdot f_o \cdot (D/t_2)$$

dengan :

$$P_{el} = \frac{2 \cdot E \cdot (t/D)^3}{1 - \nu^2} \quad P_p = 2 \cdot f_y \cdot \alpha_{fab} \cdot (t_2/D)$$

$$f_o = \frac{D_{max} - D_{min}}{D}$$

maka :

$$\begin{aligned} P_{el} &= \frac{2050341.03}{0.91} \\ &= 2253122.01 \text{ Pa} \\ P_p &= 14727272.7 \text{ Pa} \\ f_o &= 0.16273585 \\ P_c &= 3010000 \text{ Pa} \end{aligned}$$

\* *Pengecekan terhadap system collapse*

$$P_e - P_{min} \leq \frac{P_c}{\gamma_m \cdot \gamma_{SC}}$$

$$620000 \leq 2516722.41$$

memenuhi

b) *Pressure Containment* ( $P_b(t)$ )

$$\frac{2 \cdot t}{D - t} \cdot f_{cb} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}}$$

dengan :  $f_{cb} = \text{Min} \left[ f_y; \frac{f_u}{1.15} \right]$

$f_u$  = characteristic ultimate strength, (Pa)

$$\begin{aligned} f_{cb} &= 432000000 \text{ diambil nilai} \\ f_{cb} &= 446608696 \text{ yang terkecil} \\ \text{maka } P_{b(t)} &= 17300484.4 \text{ Pa} \end{aligned}$$

\* *Pengecekan terhadap pressure containment*

$$P_{li} - P_e \leq \frac{P_b(t)}{\gamma_{SC} \cdot \gamma_m}$$

$$\begin{aligned} \text{dimana } P_{li} &= P_d \cdot \gamma_{inc} + \rho_{cont} \cdot g \cdot h \\ &= 8753380 \text{ Pa} \end{aligned}$$

maka,

$$8133380 \leq 14465287.9$$

memenuhi

c) *Propagation Buckling* ( $P_{pr}$ )

$$P_{pr} = 35 \cdot f_y \cdot \alpha_{fab} \cdot (WT/D)^{2.5} = 573552.607 \text{ Pa}$$

\* Pengecekan terhadap *propagation buckling*

$$P_e - P_{min} \leq \frac{P_{pr}}{\gamma_m \cdot \gamma_{SC}}$$

$$620000 \leq 479559.036$$

tidak memenuhi

c) *Combined Loading Criteria*

\* *Internal Overpressure*

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot S_{sd}(p_i)}{\alpha_c \cdot S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left( \alpha_p \cdot \frac{p_i - p_e}{\alpha_c \cdot p_b(t_2)} \right)^2 \leq 1$$

dengan :  $\alpha_c$  = flow stress parameter

$$= (1 - \beta) + \beta \cdot \frac{f_u}{f_y}$$

$$\beta = \frac{60 - D/t}{90}$$

$M_p(t_2)$  = tahanan momen plastis, (Nm)

$$= f_y \cdot (D - t)^2 \cdot t$$

$S_p$  = Karakteristik tahanan gaya aksial plastis, (N)

$$= f_y \cdot \pi \cdot (D - t) \cdot t$$

$\alpha_p$  = faktor tekanan untuk *combined loading criteria*

$$= 1 - \beta \quad , \quad \frac{p_i - p_e}{p_b} < 2/3$$

$$= 1 - 3\beta \left( 1 - \frac{p_i - p_e}{p_b} \right) \quad , \quad \frac{p_i - p_e}{p_b} \geq 2/3$$

maka :

$$\beta = 0.01481481$$

$$\alpha_c = 1.00279835$$

$$M_p(t_2) = 5774638.69 \text{ Nm}$$

$$S_p = 19775728.5 \text{ N}$$

$$\alpha_p = \text{nilai} \quad \frac{p_i - p_e}{p_b} = 0.38265$$

maka menggunakan  $1 - \beta$

$$\alpha_p = 0.98518519$$

sehingga,

$$0.253778946 \leq 1$$

memenuhi

\* *External Overpressure*

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{|M_{Sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot S_{Sd}}{\alpha_c \cdot S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left( \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{p_e - p_{\min}}{p_c(t_2)} \right)^2 \leq 1$$

sehingga,

$$0.173146918 \leq 1$$

memenuhi

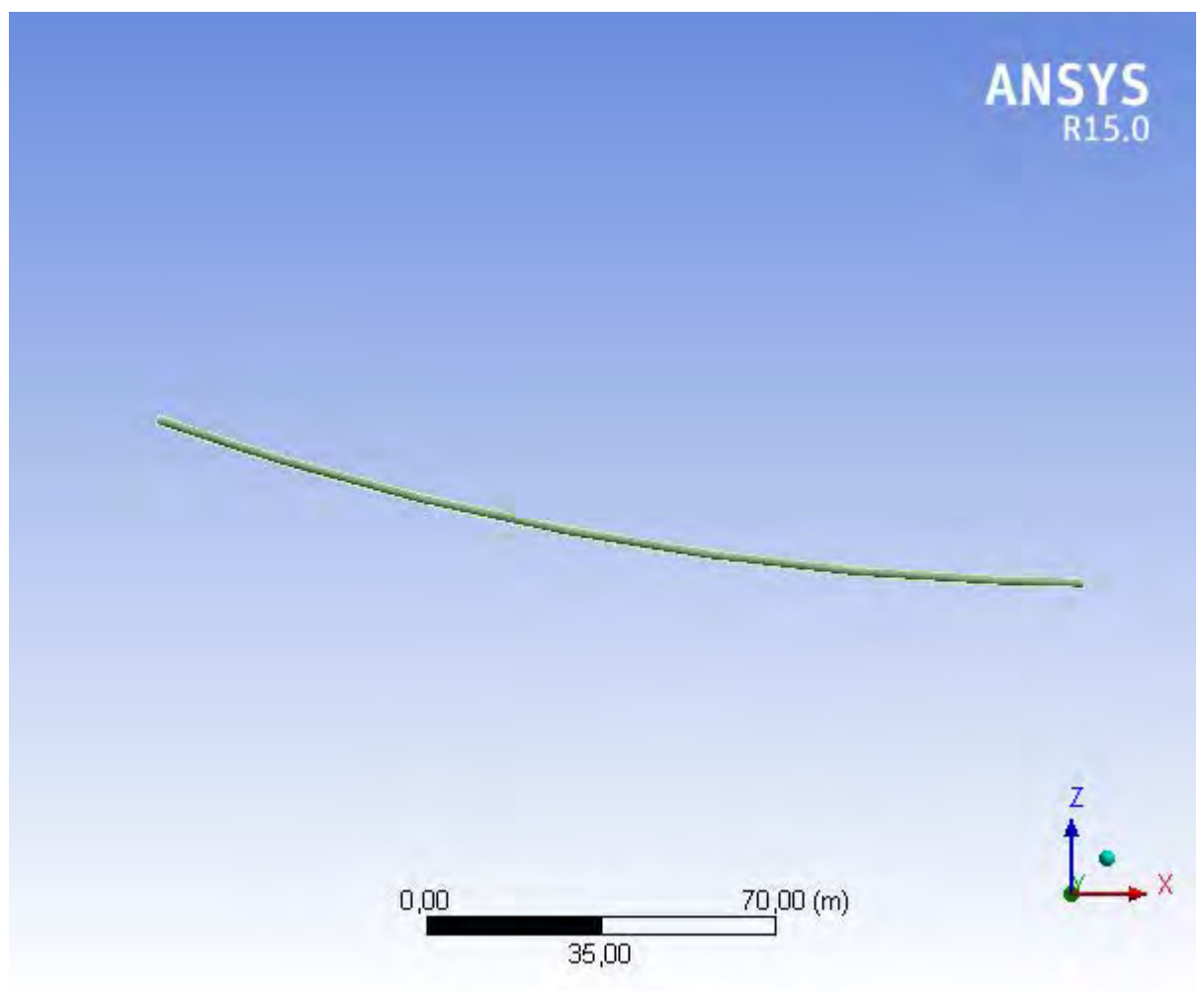
**LAMPIRAN F**  
***OUTPUT ANSYS***





## Project

|                              |                              |
|------------------------------|------------------------------|
| First Saved                  | Wednesday, December 17, 2014 |
| Last Saved                   | Tuesday, January 20, 2015    |
| Product Version              | 15.0 Release                 |
| Save Project Before Solution | No                           |
| Save Project After Solution  | No                           |



# Contents

- [Units](#)
- [Model \(A4\)](#)
  - [Geometry](#)
    - [Part](#)
    - [Parts](#)
  - [Coordinate Systems](#)
  - [Connections](#)
    - [Joints](#)
    - [Joints](#)
    - [Contact Regions](#)
  - [Mesh](#)
    - [Body Sizing](#)
  - [Static Structural \(A5\)](#)
    - [Analysis Settings](#)
    - [Loads](#)
    - [Solution \(A6\)](#)
      - [Solution Information](#)
      - [Results](#)
- [Material Data](#)
  - [Structural Steel](#)

## Units

TABLE 1

| Unit System         | Metric (m, kg, N, s, V, A) Degrees rad/s Celsius |
|---------------------|--|
| Angle               | Degrees  |
| Rotational Velocity | rad/s  |
| Temperature         | Celsius  |

## Model (A4)

### Geometry

TABLE 2  
Model (A4) > Geometry

|                 |  |
|-----------------|--|
| Object Name     | Geometry   |
| State           | Fully Defined  |
| Definition      |  |
| Source          | D:\FINAL PROJECT\Road to P3 TGL 21-01-2015\ANSYS Analysis Bending Stress\TA\TA_files\dp0\SYS\DM\SYS.agdb |
| Type            | DesignModeler  |
| Length Unit     | Meters   |
| Element Control | Program Controlled   |
| Display Style   | Body Color   |
| Bounding Box    |  |
| Length X        | 186,14 m   |
| Length Y        | 1,8577 m   |

|                                   |                                  |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| Length Z                          | 34,559 m                         |
| <b>Properties</b>                 |                                  |
| Volume                            | 122,27 m³                        |
| Mass                              | 9,5985e+005 kg                   |
| Scale Factor Value                | 1,                               |
| <b>Statistics</b>                 |                                  |
| Bodies                            | 2                                |
| Active Bodies                     | 2                                |
| Nodes                             | 92237                            |
| Elements                          | 12168                            |
| Mesh Metric                       | None                             |
| <b>Basic Geometry Options</b>     |                                  |
| Parameters                        | Yes                              |
| Parameter Key                     | DS                               |
| Attributes                        | No                               |
| Named Selections                  | No                               |
| Material Properties               | No                               |
| <b>Advanced Geometry Options</b>  |                                  |
| Use Associativity                 | Yes                              |
| Coordinate Systems                | No                               |
| Reader Mode                       | No                               |
| Saves Updated File                | No                               |
| Use Instances                     | Yes                              |
| Smart CAD Update                  | No                               |
| Compare Parts On Update           | No                               |
| Attach File Via Temp File         | Yes                              |
| Temporary Directory               | C:\Users\Asus\AppData\Local\Temp |
| Analysis Type                     | 3-D                              |
| Decompose Disjoint Geometry       | Yes                              |
| Enclosure and Symmetry Processing | Yes                              |

**TABLE 3**  
**Model (A4) > Geometry > Body Groups**

|                            |                           |
|----------------------------|---------------------------|
| Object Name                | <i>Part</i>               |
| State                      | Meshed                    |
| <b>Graphics Properties</b> |                           |
| Visible                    | Yes                       |
| <b>Definition</b>          |                           |
| Suppressed                 | No                        |
| Assignment                 | Structural Steel          |
| Coordinate System          | Default Coordinate System |
| <b>Bounding Box</b>        |                           |
| Length X                   | 186,14 m                  |
| Length Y                   | 1,8577 m                  |
| Length Z                   | 34,559 m                  |

| Properties            |                               |
|-----------------------|-------------------------------|
| Volume                | 122,27 m <sup>3</sup>         |
| Mass                  | 9,5985e+005 kg                |
| Centroid X            | 2044,1 m                      |
| Centroid Y            | 1879,9 m                      |
| Centroid Z            | -21,33 m                      |
| Moment of Inertia Ip1 | 5,7802e+006 kg·m <sup>2</sup> |
| Moment of Inertia Ip2 | 2,873e+009 kg·m <sup>2</sup>  |
| Moment of Inertia Ip3 | 2,8679e+009 kg·m <sup>2</sup> |
| Statistics            |                               |
| Nodes                 | 92237                         |
| Elements              | 12168                         |
| Mesh Metric           | None                          |

**TABLE 4**  
**Model (A4) > Geometry > Part > Parts**

|                        |                           |                   |
|------------------------|---------------------------|-------------------|
| Object Name            | Part 1                    | Part 2            |
| State                  | Meshed                    |                   |
| Graphics Properties    |                           |                   |
| Visible                | Yes                       |                   |
| Transparency           | 1                         |                   |
| Definition             |                           |                   |
| Suppressed             | No                        |                   |
| Stiffness Behavior     | Flexible                  |                   |
| Coordinate System      | Default Coordinate System |                   |
| Reference Temperature  | By Environment            |                   |
| Material               |                           |                   |
| Assignment             | Structural Steel          |                   |
| Nonlinear Effects      | Yes                       |                   |
| Thermal Strain Effects | Yes                       |                   |
| Bounding Box           |                           |                   |
| Length X               | 186,14 m                  |                   |
| Length Y               | 0,92883 m                 |                   |
| Length Z               | 34,559 m                  |                   |
| Properties             |                           |                   |
| Volume                 | 61,141 m³                 | 61,133 m³         |
| Mass                   | 4,7996e+005 kg            | 4,7989e+005 kg    |
| Centroid X             | 2044,1 m                  |                   |
| Centroid Y             | 1880,5 m                  | 1879,4 m          |
| Centroid Z             | -21,33 m                  |                   |
| Moment of Inertia Ip1  | 2,7447e+006 kg·m²         | 2,7446e+006 kg·m² |
| Moment of Inertia Ip2  | 1,4365e+009 kg·m²         |                   |
| Moment of Inertia Ip3  | 1,4338e+009 kg·m²         |                   |
| Statistics             |                           |                   |
| Nodes                  | 6237                      | 86000             |
| Elements               | 792                       | 11376             |
| Mesh Metric            | None                      |                   |

## Coordinate Systems

**TABLE 5**  
**Model (A4) > Coordinate Systems > Coordinate System**

|                            |                                 |
|----------------------------|---------------------------------|
| Object Name                | <i>Global Coordinate System</i> |
| State                      | Fully Defined                   |
| <b>Definition</b>          |                                 |
| Type                       | Cartesian                       |
| Coordinate System ID       | 0,                              |
| <b>Origin</b>              |                                 |
| Origin X                   | 0, m                            |
| Origin Y                   | 0, m                            |
| Origin Z                   | 0, m                            |
| <b>Directional Vectors</b> |                                 |
| X Axis Data                | [ 1, 0, 0, ]                    |
| Y Axis Data                | [ 0, 1, 0, ]                    |
| Z Axis Data                | [ 0, 0, 1, ]                    |

## Connections

**TABLE 6**  
**Model (A4) > Connections**

|  |                    |
|--|--------------------|
| Object Name                              | <i>Connections</i> |
| State                                    | Fully Defined      |
| <b>Auto Detection</b>                    |                    |
| Generate Automatic Connection On Refresh | Yes                |
| <b>Transparency</b>                      |                    |
| Enabled                                  | Yes                |

**TABLE 7**  
**Model (A4) > Connections > Joints**

|                  |                    |                 |
|------------------|--------------------|-----------------|
| Object Name      | <i>Joints</i>      | <i>Contacts</i> |
| State            | Fully Defined      |                 |
| Definition       |                    |                 |
| Connection Type  | Joint              | Contact         |
| Scope            |                    |                 |
| Scoping Method   | Geometry Selection |                 |
| Geometry         | All Bodies         |                 |
| Auto Detection   |                    |                 |
| Tolerance Type   | Slider             |                 |
| Tolerance Slider | 0,                 |                 |
| Tolerance Value  | 0,47333 m          |                 |
| Use Range        | No                 |                 |
| Group By         | Bodies             |                 |
| Search Across    | Bodies             |                 |
| Fixed Joints     | No                 |                 |
| Revolute Joints  | No                 |                 |
| Face/Face        |                    | Yes             |
| Face/Edge        |                    | No              |
| Edge/Edge        |                    | No              |

|          |  |             |
|----------|--|-------------|
| Priority |  | Include All |
|----------|--|-------------|

**TABLE 8**  
**Model (A4) > Connections > Joints > Joints**

|                   |                                |  |                            |  |
|-------------------|--------------------------------|--|----------------------------|--|
| Object Name       | Spherical - Ground To Multiple |  | Fixed - Ground To Multiple |  |
| State             | Fully Defined                  |  |                            |  |
| Definition        |                                |  |                            |  |
| Connection Type   | Body-Ground                    |  |                            |  |
| Type              | Spherical                      |  | Fixed                      |  |
| Suppressed        | No                             |  |                            |  |
| Reference         |                                |  |                            |  |
| Coordinate System | Reference Coordinate System    |  |                            |  |
| Mobile            |                                |  |                            |  |
| Scoping Method    | Geometry Selection             |  |                            |  |
| Applied By        | Remote Attachment              |  |                            |  |
| Scope             | 2 Faces                        |  |                            |  |
| Body              | Multiple                       |  |                            |  |
| Initial Position  | Unchanged                      |  |                            |  |
| Behavior          | Rigid                          |  |                            |  |
| Pinball Region    | All                            |  |                            |  |

**TABLE 9**  
**Model (A4) > Connections > Contacts > Contact Regions**

| Model (A1) > Connections > Contacts > Contact Regions |  |           |
|---|--|-----------|
| Object Name   | Bonded - Part 2 To Part 1   Contact Region |           |
| State   | Fully Defined                              |           |
| Scope   |  |           |
| Scoping Method  | Geometry Selection                         |           |
| Contact   | 2 Faces                                    | 3 Faces   |
| Target  | 2 Faces                                    | 3 Faces   |
| Contact Bodies  | Part 2                                     | Part 1    |
| Target Bodies   | Part 1                                     | Part 2    |
| Definition  |  |           |
| Type  | Bonded                                     |           |
| Scope Mode  | Manual                                     | Automatic |
| Behavior  | Program Controlled                         |           |
| Trim Contact  | Program Controlled                         |           |
| Suppressed  | No   |           |
| Trim Tolerance  |  | 0,47333 m |
| Advanced  |  |           |
| Formulation   | Program Controlled                         |           |
| Detection Method                                      | Program Controlled                         |           |
| Penetration Tolerance                                 | Program Controlled                         |           |
| Elastic Slip Tolerance                                | Program Controlled                         |           |
| Normal Stiffness                                      | Program Controlled                         |           |
| Update Stiffness                                      | Program Controlled                         |           |
| Pinball Region  | Program Controlled                         |           |
| Geometric Modification                                |  |           |
| Contact Geometry Correction                           | None                                       |           |

**Mesh**

**TABLE 10**  
**Model (A4) > Mesh**

|  |                       |
|--|-----------------------|
| Object Name                              | <i>Mesh</i>           |
| State                                    | Solved                |
| <b>Defaults</b>                          |                       |
| Physics Preference                       | Mechanical            |
| Relevance                                | 100                   |
| <b>Sizing</b>                            |                       |
| Use Advanced Size Function               | Off                   |
| Relevance Center                         | Coarse                |
| Element Size                             | Default               |
| Initial Size Seed                        | Active Assembly       |
| Smoothing                                | Medium                |
| Transition                               | Fast                  |
| Span Angle Center                        | Coarse                |
| Minimum Edge Length                      | 0,120 m               |
| <b>Inflation</b>                         |                       |
| Use Automatic Inflation                  | None                  |
| Inflation Option                         | Smooth Transition     |
| Transition Ratio                         | 0,272                 |
| Maximum Layers                           | 5                     |
| Growth Rate                              | 1,2                   |
| Inflation Algorithm                      | Pre                   |
| View Advanced Options                    | No                    |
| <b>Patch Conforming Options</b>          |                       |
| Triangle Surface Mesher                  | Program Controlled    |
| <b>Patch Independent Options</b>         |                       |
| Topology Checking                        | Yes                   |
| <b>Advanced</b>                          |                       |
| Number of CPUs for Parallel Part Meshing | Program Controlled    |
| Shape Checking                           | Standard Mechanical   |
| Element Midside Nodes                    | Program Controlled    |
| Straight Sided Elements                  | No                    |
| Number of Retries                        | Default (4)           |
| Extra Retries For Assembly               | Yes                   |
| Rigid Body Behavior                      | Dimensionally Reduced |
| Mesh Morphing                            | Disabled              |
| <b>Defeaturing</b>                       |                       |
| Pinch Tolerance                          | Please Define         |
| Generate Pinch on Refresh                | No                    |
| Automatic Mesh Based Defeaturing         | On                    |
| Defeaturing Tolerance                    | Default               |
| <b>Statistics</b>                        |                       |
| Nodes                                    | 92237                 |
| Elements                                 | 12168                 |
| Mesh Metric                              | None                  |

**TABLE 11**  
**Model (A4) > Mesh > Mesh Controls**

|             |                    |
|-------------|--------------------|
| Object Name | <i>Body Sizing</i> |
| State       | Fully Defined      |

| Scope          |                    |
|----------------|--------------------|
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry       | 1 Body             |
| Definition     |                    |
| Suppressed     | No                 |
| Type           | Element Size       |
| Element Size   | 0,3 m              |
| Behavior       | Soft               |

## Static Structural (A5)

**TABLE 12**  
**Model (A4) > Analysis**

| Object Name             | <i>Static Structural (A5)</i> |
|-------------------------|-------------------------------|
| State                   | Solved                        |
| Definition              |                               |
| Physics Type            | Structural                    |
| Analysis Type           | Static Structural             |
| Solver Target           | Mechanical APDL               |
| Options                 |                               |
| Environment Temperature | 22, °C                        |
| Generate Input Only     | No                            |

**TABLE 13**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Analysis Settings**

| Object Name                   | <i>Analysis Settings</i> |
|-------------------------------|--------------------------|
| State                         | Fully Defined            |
| Step Controls                 |                          |
| Number Of Steps               | 1,                       |
| Current Step Number           | 1,                       |
| Step End Time                 | 1, s                     |
| Auto Time Stepping            | Program Controlled       |
| Solver Controls               |                          |
| Solver Type                   | Program Controlled       |
| Weak Springs                  | Program Controlled       |
| Large Deflection              | Off                      |
| Inertia Relief                | Off                      |
| Restart Controls              |                          |
| Generate Restart Points       | Program Controlled       |
| Retain Files After Full Solve | No                       |
| Nonlinear Controls            |                          |
| Newton-Raphson Option         | Program Controlled       |
| Force Convergence             | Program Controlled       |
| Moment Convergence            | Program Controlled       |
| Displacement Convergence      | Program Controlled       |



|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| Rotation Convergence            | Program Controlled   |
| Line Search                     | Program Controlled   |
| Stabilization                   | Off  |
| <b>Output Controls</b>          |  |
| Stress                          | Yes  |
| Strain                          | Yes  |
| Nodal Forces                    | No   |
| Contact Miscellaneous           | No   |
| General Miscellaneous           | No   |
| Store Results At                | All Time Points  |
| <b>Analysis Data Management</b> |  |
| Solver Files Directory          | D:\FINAL PROJECT\Road to P3 TGL 21-01-2015\ANSYS Analysis Bending Stress\TA\TA_files\dp0\SYS\MECH\ |
| Future Analysis                 | None   |
| Scratch Solver Files Directory  |  |
| Save MAPDL db                   | No   |
| Delete Unneeded Files           | Yes  |
| Nonlinear Solution              | Yes  |
| Solver Units                    | Active System  |
| Solver Unit System              | mks  |

**TABLE 14**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Loads**

|                   |                          |                    |          |               |                          |
|-------------------|--------------------------|--------------------|----------|---------------|--------------------------|
| Object Name       | Force                    | Moment             | Moment 2 | Fixed Support | Force 2                  |
| State             | Fully Defined            |                    |          |               |                          |
| Scope             |                          |                    |          |               |                          |
| Scoping Method    | Geometry Selection       |                    |          |               |                          |
| Geometry          | 1 Face                   | 2 Faces            |          |               | 8 Faces                  |
| Definition        |                          |                    |          |               |                          |
| Type              | Force                    | Moment             |          | Fixed Support | Force                    |
| Define By         | Components               |                    |          |               | Components               |
| Coordinate System | Global Coordinate System |                    |          |               | Global Coordinate System |
| X Component       | 0, N (ramped)            | 6414, N·m (ramped) |          |               | 0, N (ramped)            |
| Y Component       | 8539,9 N (ramped)        | 0, N·m (ramped)    |          |               | 0, N (ramped)            |
| Z Component       | 0, N (ramped)            | 0, N·m (ramped)    |          |               | 9188,9 N (ramped)        |
| Suppressed        | No                       |                    |          |               |                          |
| Behavior          |                          | Deformable         |          |               |                          |
| Advanced          |                          |                    |          |               |                          |
| Pinball Region    |                          | All                |          |               |                          |

## Solution (A6)

**TABLE 15**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution**

|                                 |                      |
|---------------------------------|----------------------|
| Object Name                     | <i>Solution (A6)</i> |
| State                           | Solved               |
| <b>Adaptive Mesh Refinement</b> |                      |
| Max Refinement Loops            | 1,                   |
| Refinement Depth                | 2,                   |
| <b>Information</b>              |                      |
| Status                          | Done                 |

**TABLE 16**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information**

|                                 |                             |
|---------------------------------|-----------------------------|
| Object Name                     | <i>Solution Information</i> |
| State                           | Solved                      |
| <b>Solution Information</b>     |                             |
| Solution Output                 | Solver Output               |
| Newton-Raphson Residuals        | 0                           |
| Update Interval                 | 2,5 s                       |
| Display Points                  | All                         |
| <b>FE Connection Visibility</b> |                             |
| Activate Visibility             | Yes                         |
| Display                         | All FE Connectors           |
| Draw Connections Attached To    | All Nodes                   |
| Line Color                      | Connection Type             |
| Visible on Results              | No                          |
| Line Thickness                  | Single                      |
| Display Type                    | Lines                       |

**TABLE 17**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Results**

|                           |                               |                   |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------|
| Object Name               | Equivalent Stress             | Total Deformation |
| State                     | Solved                        |                   |
| Scope                     |                               |                   |
| Scoping Method            | Geometry Selection            |                   |
| Geometry                  | All Bodies                    |                   |
| Definition                |                               |                   |
| Type                      | Equivalent (von-Mises) Stress | Total Deformation |
| By                        | Time                          |                   |
| Display Time              | Last                          |                   |
| Calculate Time History    | Yes                           |                   |
| Identifier                |                               |                   |
| Suppressed                | No                            |                   |
| Integration Point Results |                               |                   |
| Display Option            | Averaged                      |                   |
| Average Across Bodies     | No                            |                   |
| Results                   |                               |                   |
| Minimum                   | 16419 Pa                      | 0, m              |
| Maximum                   | 404529766.7 Pa                | 6,5231e-003 m     |

# Material Data

## Structural Steel

**TABLE 18**  
**Structural Steel > Constants**

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| Density                          | 7850, kg m <sup>-3</sup>                |
| Coefficient of Thermal Expansion | 1,2e-005 C <sup>-1</sup>                |
| Specific Heat                    | 434, J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> |
| Thermal Conductivity             | 60,5 W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>  |
| Resistivity                      | 1,7e-007 ohm m                          |

**TABLE 19**  
**Structural Steel > Compressive Ultimate Strength**

|                                  |
|----------------------------------|
| Compressive Ultimate Strength Pa |
| 0,                               |

**TABLE 20**  
**Structural Steel > Compressive Yield Strength**

|                               |
|-------------------------------|
| Compressive Yield Strength Pa |
| 4,5e+008                      |

**TABLE 21**  
**Structural Steel > Tensile Yield Strength**

|                           |
|---------------------------|
| Tensile Yield Strength Pa |
| 4,5e+008                  |

**TABLE 22**  
**Structural Steel > Tensile Ultimate Strength**

|                              |
|------------------------------|
| Tensile Ultimate Strength Pa |
| 5,4e+008                     |

**TABLE 23**  
**Structural Steel > Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion**

|                         |
|-------------------------|
| Reference Temperature C |
| 22,                     |

**TABLE 24**  
**Structural Steel > Alternating Stress Mean Stress**

| Alternating Stress Pa | Cycles  | Mean Stress Pa |
|-----------------------|---------|----------------|
| 3,999e+009            | 10,     | 0,             |
| 2,827e+009            | 20,     | 0,             |
| 1,896e+009            | 50,     | 0,             |
| 1,413e+009            | 100,    | 0,             |
| 1,069e+009            | 200,    | 0,             |
| 4,41e+008             | 2000,   | 0,             |
| 2,62e+008             | 10000   | 0,             |
| 2,14e+008             | 20000   | 0,             |
| 1,38e+008             | 1,e+005 | 0,             |
| 1,14e+008             | 2,e+005 | 0,             |

|           |         |    |
|-----------|---------|----|
| 8,62e+007 | 1,e+006 | 0, |
|-----------|---------|----|

**TABLE 25**  
**Structural Steel > Strain-Life Parameters**

| Strength Coefficient Pa | Strength Exponent | Ductility Coefficient | Ductility Exponent | Cyclic Strength Coefficient Pa | Cyclic Strain Hardening Exponent |
|-------------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| 9,2e+008                | -0,106            | 0,213                 | -0,47              | 1,e+009                        | 0,2                              |

**TABLE 26**  
**Structural Steel > Isotropic Elasticity**

| Temperature C | Young's Modulus Pa | Poisson's Ratio | Bulk Modulus Pa | Shear Modulus Pa |
|---------------|--------------------|-----------------|-----------------|------------------|
|               | 2,e+011            | 0,3             | 1,6667e+011     | 7,6923e+010      |

**TABLE 27**  
**Structural Steel > Isotropic Relative Permeability**

| Relative Permeability |
|-----------------------|
| 10000                 |

## DAFTAR LAMPIRAN

|  |    |
|--|----|
| LAMPIRAN A PERHITUNGAN TEORI GELOMBANG .....           | A1 |
| LAMPIRAN B PERHITUNGAN KOEFISIEN HIDRODINAMIK.....     | B1 |
| LAMPIRAN C PERHITUNGAN PANJANG <i>SPAN</i> STATIK..... | C1 |
| LAMPIRAN D PERHITUNGAN TEGANGAN .....                  | D1 |
| LAMPIRAN E PERHITUNGAN PENGECEKAN <i>ULS</i> .....     | E1 |
| LAMPIRAN F <i>OUTPUT ANSYS</i> .....                   | F1 |

## DAFTAR PUSTAKA

- Abizar, R. M. 2008. *Perencanaan Pipa dan Expansion Spool pada Pipa Penyalur SPM*. Tugas Akhir. Program Studi Teknik Kelautan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Airlangga, A. Z. 2010. *Analisis Statik dan Dinamik Pipa Bawah Laut yang Mengalami Freespanning dengan Studi Kasus Pipa 14 Inchi di Area Hangtuh*. Tugas Akhir. Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- American Bureau of Shipping. 2005. *Commentary on the Guide-Buckling and Ultimate Strength Assesment for Offshore Structures*. Houston.
- Arif, A. 2008. *Analisis Free Span Untuk Pipeline di Bawah Laut (Studi Kasus : Pipeline di Area Hang Tuah)*. Tugas Akhir. Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Bambang. 2007. *Pusat Gempa di Lepas Pantai Pulau Jawa*. Antara News, 9 Agustus
- Cook, R. D., D. S. Malkus, dan M. E. Plesha. 1989. *Concepts and Application of Finite Element Methods, 3rd ed*. New York : Wiley.
- Det Norske Veritas Offshore Standards F101. 2012. *Submarine Pipeline System*. Norway.
- Det Norske Veritas Recommended Practices F105. 2006. *Free Spanning Pipelines*. Norway.
- Febrian, D. 2013. *Perbandingan Analisa Free Span Menggunakan DNV RP F-105 "Freespanning Pipeline" dengan DNV 1981 "Rule for Submarine Pipelines System"*. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- Guo, B., S. Song., J. Chacko., dan A. Ghalambor. 2005. *Offshore Pipelines*. Burlington : Elsevier.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi. 2010. *Peta Potensi Cadangan Gas Bumi di Indonesia*. Jakarta.

- Mousselli, A. H. 1981. *Offshore Pipeline Design, Analysis, and Methods*. Oklahoma : Penn Well Books
- Mulyati. 2013. *Mekanika Bahan*. Padang
- Navaro, M. A. 2010. *Asesmen Statik dan Dinamik untuk Pipa Bawah Laut yang Mengalami Free Spanning, Studi Kasus : Belanak Field*. Tugas Akhir. Program Studi Teknik Kelautan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Nugroho, B. S. 2009. *Analisis Tegangan Pipa Bawah Laut pada Kondisi In-place, Hydrotest, dan Operasi*. Tugas Akhir. Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Pratama, D. A. 2007. *Analisis Free Span Pipa Bawah Laut dan Span Remediation*. Tugas Akhir. Program Studi Teknik Kelautan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- PT. Perusahaan Gas Negara (Persero) Tbk,. 2005. *Design Basis Manual Pipeline Offshore*. Jakarta.
- PT. Perusahaan Gas Negara (Persero) Tbk,. 2005. *MPS Pipeline Design*. Jakarta.
- Puspitasari, R. 2008. *Analisis Free Span Pipa Bawah Laut*. Tugas Akhir. Program Studi Teknik Kelautan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Putri, A. F. S. 2011. *Analisa Ultimate Strength Fixed Platform Pasca Subsidence*. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- Soegiono. 2007. *Pipa Laut*. Surabaya : Airlangga University Press.
- Tawekal, J. R. 2012. *Desain Analisis Tegangan Pipeline Crossing*. Tugas Akhir. Program Studi Teknik Kelautan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Triatmodjo, Bambang. 1999. *Teknik Pantai*. Yogyakarta.

## BIODATA PENULIS



Ibnu Khanifudin, anak pertama dari tiga bersaudara ini lahir di Gresik pada tanggal 4 Januari 1992. Pendidikan formal penulis dimulai dengan menyelesaikan jenjang Pendidikan Dasar di SD Muhammadiyah 1 Gresik pada tahun 2004 dan SMP Negeri 1 Gresik pada tahun 2007. Kemudian menyelesaikan jenjang Pendidikan Menengah di SMA Negeri 1 Kebomas, Gresik pada tahun 2010. Lulus dari SMA, penulis melanjutkan ke jenjang Pendidikan Tinggi Strata 1 di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya melalui jalur PMDK Reguler dan terdaftar sebagai mahasiswa dengan NRP 4310 100 032. Selama menempuh masa perkuliahan, penulis sangat aktif di beberapa organisasi kemahasiswaan dan kepanitiaan, juga dalam berbagai pelatihan, seminar, dan kegiatan. Dalam bidang organisasi kemahasiswaan, penulis pernah mendapatkan amanah sebagai staf Tim Kestari HIMATEKLA FTK ITS periode 2011-2012 dan Ketua HIMATEKLA FTK ITS periode 2012-2013. Sedangkan dalam bidang kepanitiaan, salah satunya mendapatkan amanah menjadi Ketua ITS EXPO 2012. Penulis juga aktif dalam kegiatan kepanitiaan LKMM (Latihan Keterampilan Manajemen Mahasiswa) dan dalam bidang Unit Kegiatan Mahasiswa, pernah mengikuti UKM futsal, sepak bola, dan olahraga air divisi renang. Prestasi yang pernah diraih oleh penulis adalah menjadi mahasiswa berprestasi peringkat ke-3 tingkat jurusan periode 2013/2014 dan *runner-up ITS Futsal Championship* pada tahun 2014. Penulis pernah berkesempatan untuk melaksanakan kerja praktik di PT. Pertamina RU-IV Balongan, Indramayu dan PT. PGN SBU TSJ, Jakarta Pusat. Selama masa studi, penulis sangat tertarik dengan bidang ahli perancangan dan produksi bangunan laut sehingga hal itulah yang mendasari penulis untuk membuat tugas akhir ini dengan fokus *offshore pipeline*. Penulis dapat dihubungi melalui ***khanifudin.ibnu@gmail.com***.